

明 細 書

波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法

技術分野

本発明は、波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法に関する

背景技術

通信システムの伝送容量は増加の一途をたどっており、光ファイバーを用いた光通信システムにより伝送容量は著しく増加している。例えば、通信システムは、ポイント・トゥー・ポイントの幹線系と、メトロ系及びアクセス系とに分けられるが、前者の幹線系では既に光通信システムが普及し、後者においても電気通信システムから光通信システムへの移行が進められている。すなわち、通信システム全体が光通信システムによって構築されようとしている。

近年、波長分割多重方式により、1本の光ファイバーで伝送可能な情報量が飛躍的に増加した。同方式では、光ファイバーの低損失帯域をスペクトル変換効率0.4bit/Hzで利用すると、1本の光ファイバーで伝送可能な伝送容量は約3.2Tbit/sとなる。具体的には、この伝送容量は、各チャンネル（波長）の信号光の伝送速度が現在利用されている10Gbit/sであるとした場合、320のチャンネルによって実現される。

ところで、信号光は、長距離を伝搬する際、必ず、その信号波形、タイミング、及び強度が劣化する。そして、ある程度の距離を伝播した信号光は必ず再生処理を行なう必要がある。そのため、光通信システムには、通常、劣化した信号光を再生するための光信号再生システムが組み込まれている。この光信号再生システムは、例えば、劣化した信号光を受信してそれを電気信号に変える受信装置と、この電気信号に対して増幅、雑音除去、波形再生、クロック再生等の所望の再生処理を行なう再生装置と、そして再生処理を受けた電気信号を再び信号光に変換してそれを光伝送路へ送信する送信装置とを備えている。

BEST AVAILABLE COPY

具体的には、上記したチャンネル数が320にまでおよぶ複数の信号光が伝播する光ファイバに介挿される光信号再生システムの場合には、このチャンネル数に対応して、320台の光受信装置、再生装置、及び送信装置が組み込まれる。

このように多数の装置を含む光信号再生システムは、小型化が困難であり、また、消費電力が大きいという問題がある。

更には、上述したように光通信システムがメトロ系及びアクセス系に使用された場合、320チャンネルの光信号再生システムを各中継所に多数設置する必要が生じるため、光通信システム全体が大型化し、コストの増加や消費電力の増加を招く。

このような問題を解決する一つの方法としては、波長分割多重方式におけるチャンネル数を削減し、各チャンネルの伝送速度を上昇させる方法があげられる。同一の伝送容量を達成する場合には、各チャンネルの伝送速度と、波長分割多重チャンネル数とは反比例の関係にあるからである。

しかし、上記した光信号再生システムに用いられている再生装置は、電気信号に対して処理を行なう電気デバイスであって、物理的に応答速度の上限をもつ。例えば、電気デバイスで処理可能な信号の伝送速度の限界は、現在40Gbit/sであり、この伝送速度では、なお約80ものチャンネル数が必要である。更には、電気デバイスをそのように高速駆動させるためには高い電力が必要となる。したがって、電気デバイスを用いた光信号再生システムにおいては、各チャンネルの伝送速度には上限があり、現実には、その小型化及び消費電力の低減は困難である。

このような電気デバイスを用いた光信号再生システムにおける問題を解決する方法の一つに、信号光を電気信号へと変換することなく、光の状態のまま信号再

生処理を行なう全光信号再生方法がある。この全光信号再生方法を用いた装置は、通常、高速の電気変調器と物質の非線形光学効果を利用した再生装置とからなる。

しかしながら、この全光信号再生装置は、電気変調器を用いるため、光電変換を行なう光信号再生システムと同様にその処理速度に上限がある。さらに40Gbit/s以上の伝送速度の信号光を再生処理する場合、時間分割することで伝送信号光の伝送速度を落とし、信号再生を行なった後、時間分割多重する必要が生じるため、大規模な装置になる。

また、上記した全光信号再生装置は、光信号の再生に非線形光学応答（非線形光学効果）を利用しているが、その場合には、以下の問題も発生する。

すなわち、大容量光通信システムにおいて、互いに波長の異なる複数の信号光を含む波長分割多重光が光伝送路を伝搬した場合、伝搬後の波長分割多重光に含まれる各信号光の偏光状態は波長毎にわずかに異なる。このような状態にある波長分割多重光に対して、一括して、非線形光学効果を利用した全光信号再生装置による再生処理を施した場合、入射光の偏光状態に応じて非線形光学効果の大きが大きく変化するため、再生された波長分割多重光には、良好に再生されない、もしくは全く再生されない信号光が含まれてしまうという問題である。

以上では光再生装置の入力伝送光偏波状態に注目して、その問題点を示した。以下では、光再生システムに注目して、その現状とその問題点を示す。光再生とは伝送によって劣化した光信号の強度、波形整形そしてタイミングを再生する機能（re-amplification、re-shapingとre-timing、以下ではO3Rと略す）を意味する。この機能を有する光再生システムでは、無限遠（長距離）の光ファイバ伝送が可能となりえる。

上述した無限遠（長距離）伝送に関してはLeutholdらにより報告されている（Le

Leuthold et al., Electron. Lett., 38, p.890, 2002)。この報告では、O3R再生器を用いる40Gb/s 1,000,000 km伝送について記述されている。

Leutholdらは、本報告において、時間再生に必要な光クロック抽出（伝送信号光に同期するクロックパルス列の発生技術）及びスイッチングにおいて電子回路技術を用いている。このため、この装置では電子回路技術では対応不可能な伝送スピードには対応できない。例えば160Gb/sシステムのような電子回路制限以上の伝送スピードを有するシステムには適用不可能である。

なお、160 Gb/sシステムに関しては、光スイッチを用いる光再生システムが報告されている（Schubert et al., Electron. Lett., 38, p.903, 2002）。しかしながら、このシステムでは、クロック抽出装置を有していない為にO3R装置として機能出来ないと考えられる。

上述をまとめると、有効な全光技術を基本とするO3Rは、実現されていないのが現状である。しかしながら、O3Rの各コンポーネントとなる波形整形技術及び時間再生技術単体に関しては多数の報告がある。以下にこれらの報告を示す。ただし、ここでは本発明に関連する光ファイバを基本とする技術に絞っている。

はじめに、全光波形整形技術について説明する。この技術手法は2つの方式に大別される。一つ目は、光ファイバの光非線形性と異常分散性の複合的効果の結果として形成されるソリトンを活用する手法である（Hasegawa and Tappert, Appl. Phys. Lett., 23, p.142, 1973）。この手法に基づく波形整形器は、soliton converterと呼ばれる。もう一つは、光ファイバ非線形性を介した光パルスの自己位相変調効果に基づく手法である（Mamyshev, ECOC' 98, p.475, 1998）。これは提案者の名前に由来しMamyshevフィルタと称されている。スーパーコンティニューム光を活用する方法はこれの追究型と位置づけられる。

前者 (soliton converter) を用いたシステム実験としては、 $4 \times 40\text{Gb/s}$ 信号の 10,000 km 伝送が報告されている (Dany et al., Opt. Lett., 25, p. 793, 2000)。後者 (Mamyshev フィルタ) は前述した Leuthold らの 1,000,000 km 伝送路に活用されている (Leuthold et al., Electron. Lett., 38, p. 890, 2002)。これらはいずれもシステムの観点からの報告であり、それらデバイス単体としての性能は明確に記述されていない (数少ない報告例が Dany et al., ECOC' 01, We. P. 45, 2001 である)。特に、soliton converter では、ソリトン効果を介する雑音増大も問題となる (Kubota et al., J. Opt. Soc. Am. B, 16, p. 2223, 1999) 為、デバイス性能の観点からの設計も重要となる。つまり、これらのデバイス性能を明らかにし、デバイス単体の最適設計指針を得ることが今後の課題となる。

次に時間再生技術について説明する。この技術の主流は光クロック抽出と光スイッチ技術の複合法である。この構成を図 3 8 に示す。光クロック抽出部と光スイッチ部から構成される。前者 (光クロック抽出部) は、入力信号 (伝送信号に相当する光信号もしくは電気信号) と局所光 (クロック基準となり得る光パルス列、光 local oscillator (光 L0) とも称される) の位相を一致させるものである。言い換えると、光クロック抽出は、入力光と局所光との間の同期を取ることで実現される。その為、光 L0 には繰返し周波数可変性が必要である。

後者 (光スイッチ部) は、光領域での乗算機能を実現する光ファイバにおける非線形効果を活用する光デバイス、例えば四光波混合 (four wave mixing: FWM) デバイスや非線形光ループミラー (nonlinear optical loop mirror: NOLM)、を利用した光スイッチである。以下に、光クロック抽出及び光スイッチ技術の詳細について述べる。

図 3 8 において破線で囲まれている部分が光クロック抽出部であり、これは光位相比較部、光 L0 発生部とコントローラ回路から成る。光位相比較器において外部信号光と光 L0 の位相差を検出し、その誤差が小さくなるように光 L0 の発振周波数

(パルス列の繰返し周波数に対応) を調整する。

この結果、外部信号光と光LOの同期が実現され、外部信号と同期の取れた時間位置が正確なパルス列（今後はクロックパルス列と呼ぶ）が出力として得られる。両者の位相を比較する部分に、電子回路技術ではなく、非線形光学効果を活用することによって160 GHzを超える高速動作可能な位相比較器が実現される。以上のような光領域における位相比較器を用いる同期法はoptical phase locked loop (OPLL) と称される。実際に、NOLMを用いて2台のLDからのビート光と外部信号光の同期を取ることに伴うクロック抽出が提案されている (Bigo et al., US6,239,893 B1)。

ここで注目すべき内容は、このOPLLの出力光クロック列のタイミングジッタ（クロックパルスの時間揺らぎ）である。タイミングジッタとは、クロックパルスの時間位置のズレ量を意味する。このジッタは伝送システムの性能劣化の要因となり得る為に、この抑圧は重要である。クロックパルス列のタイミングジッタはOPLL動作速度と相関があり、OPLL動作が高速であるほどジッタは減少する。即ち、OPLL高速化がジッタ低減化に効果的である。

しかしながら、上記技術 (Bigo et al., US6,239,893 B1) のようにNOLMを用いるとOPLLループが長尺となる為にOPLL動作帯域が制限されてしまう。その結果、ジッタ低減が困難となる。これを解決する為には、位相比較器に用いる光非線形デバイスのファイバ短尺化が重要となろう。ファイバを短尺化することにより、OPLL動作帯域が制限されず、言い換えるにOPLLの高速動作が実現され、低ジッタな高品質クロックパルス列発生が可能となる。

上述クロック抽出技術と共に時間再生技術に必要なのが光スイッチ技術である。ここでは、光ファイバの非線形効果を活用した光スイッチの典型例であるFWMを活用する手法について説明する。光ファイバに波長が異なる2色の光波を入力す

ると、それら入力光の何れかが非線形効果に十分な光パワーを有する場合においては、それらとは色の異なる新たな光波が発生する。これがFWM現象である。

クロックパルス列と信号光が光ファイバに入力された場合、そのFWM発生光には入力信号光の情報が重畳されているだけでなく、そのパルスタイミングはクロックパルス列によって決定される。従って、情報が乗った低ジッタの光信号パルス列が得られる。これがFWMを基本とする時間再生の原理である。ただし、光ファイバ伝搬する光パルスには非線形効果だけではなく分散効果も影響を与える。

この効果或いはこれら効果の複合により、パルス伝搬においてパルス波形が変化する。その結果、FWM光の波形歪が生じる。これを抑圧する為には、ファイバ分散値や入力パワーの最適化を行うことが有効であるが、具体的な数値やその制御方法等は明らかにされていない。

以上、光再生システムに必要最低限のコンポーネントに関して記述した。この他に光再生システムの性能を向上させる技術も重要である。ここでは本発明に関連する以下の二つのコンポーネントについてまとめる。(1)光パルス波形を光スイッチに適した波形に変換する装置、(2)光パルス成分と光雑音成分を分離する装置。

はじめに、上述した(1)光パルス波形を光スイッチに適した波形に変換する装置に関連する、光スイッチにおける強度雑音増大の抑圧に有効なパルス矩形化技術をまとめる。一般に、光スイッチでは光非線形性と分散の相互作用の結果として、入力される伝送信号パルスの時間揺らぎ（位相揺らぎ）が時間再生された出力信号光の強度揺らぎに変換される。これを説明するのが図39Aである。

ここでは、ジッタを有するパルス列とクロックパルス列の光スイッチを考える。光スイッチ出力パルスパワーは伝送パルスとクロックパルスの時間重なりに相関

がある。その為に、ジッタによる両者パルス重なりの変化が光スイッチ出力パルスパワー揺らぎに変換される。この位相揺らぎから光強度揺らぎへの変換を抑制する為には、伝送信号光パルスあるいは抽出したクロックパルスの矩形化変換が有効である（図 3 9 B）。

この矩形化方法としては、波長分散や偏波分散を活用する方法と、非線形効果と正常分散の複合的效果を活用する方法に大別される。前者の例はファイバブラッググレーティングや偏波保持ファイバを用いた手法（Lee et al., OFC2001, PD30-1, 2001およびSchubert et al., Electron. Lett., 38, p.903, 2002）であり、後者の例は正常分散ファイバを用いる方式（原理の報告はNakatsuka et al., Phys. Rev. Lett., 47, p.910, 1981）である。

前者の線形動作を基本とする方式では、変換される矩形化の立下り・立上りの急峻さは入力パルス幅によって決定される。即ち、急峻な矩形化パルスを得る為には、それに対応する超短光パルスの入力が必要となる。それに比べて、後者は急峻な矩形波への波形変換が可能である利点を有しているが、矩形化に必要な非線形効果と分散効果を得る為には、入力光の高パワー化やファイバ長尺化が必須となる。

次に、上述した（2）光パルス成分と光雑音成分を分離する装置について説明する。ここでは、雑音除去コンポーネントについてまとめる。光パルスには雑音が付加されている。この雑音の主な成分は、光増幅に伴い発生する自然放出光（amplified spontaneous emission light: ASE）である。一般に、雑音は信号光よりも広帯域な光スペクトルを有している為、信号光帯域外の雑音成分は光フィルタによってある程度除去することができる。

しかしながら、信号光帯域内の雑音成分は残留する。この雑音を除去する為には、前述の波形整形を行う他に光ソリトンの性質を活用する方法がある。ここでは

本発明に関連した後者に注目する。

光ソリトン伝搬では、誘導ラマン散乱 (stimulated Raman scattering: SRS) によってソリトンが長波長側にシフトする現象 (ソリトン自己周波数シフト: SSFS: soliton self-frequency shift) が報告されている (Mitschke and Mollenauer, Opt. Lett., 11, p. 659, 1986)。この現象は、ソリトンに ASE 雑音が付加されていても生じ得る。この性質を活用するノイズ除去法としては、この現象を活用し、ソリトンと ASE 雑音成分を (周波数的に) 分離し、フィルタリングする方法が提案されている (並木ら、特開2001-109024号)。その雑音除去装置の構成を図 40A に示す。

これは異常分散ファイバ (anomalous-dispersion fiber: ADF) と光フィルタから成る。図 40B 上部に示すような雑音成分を有する光ソリトンが ADF に入力される。そこでの伝搬では、光ソリトン成分が SRS によって SSFS する。ここで注目すべきは、この SRS によってソリトン成分は長波長側にシフトするが、雑音成分は長波長側に波長シフトしない点である。従って、シフト後のソリトン成分のみを出力光フィルタによって抽出することによって信号光帯域内であった雑音成分をも除去することが可能となる (図 40B 下部)。

更に、この現象では波長シフトも伴う為に、SSFS の制御によって信号光を所望の波長に調整することも可能である。しかしながら、一般に SSFS はフェムト秒領域において生じる現象である為に、ピコ秒ソリトン伝搬における SSFS やその効率化の為には更なる工夫が必要である。

以上、光再生システムにおける現状とその問題を記述した。本発明はこれら問題を解決し、かつ簡素な O3R システムを提供することを目的とする。

また、本発明は上記した問題を解決し、大伝送容量、小型化及び省電力化が実

現可能であり、かつ、波長分割多重光における全ての信号光を再生することができる波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法の提供を目的とする。

発明の開示

上記した目的を達成するために、本発明の光再生システムの第1の態様は、ソリトンコンバータ (Soliton Converter)、パルスローラ (Pulse Roller)、カーシャッタ (Kerr-shutter)、又はソリトンピュリファイア (Soliton Purifier) のうち少なくとも1つの機器を有する再生装置が備えられ、劣化した信号光を再生する光再生システムである。

本発明の光再生システムの他の態様は、前記再生装置の前段又は前記再生装置の内部に偏波コンバータが備えられた光再生システムである。

本発明の光再生システムの他の態様は、前記再生装置の前段、又は、前記再生装置の前段に前記偏波コンバータが備えられた場合には前記偏波コンバータの前段に、分波装置が備えられた光再生システムである。

本発明の光再生システムの他の態様は、前記再生装置の後段に、合波装置が備えられた光再生システムである。

本発明の光再生システムの他の態様は、前記再生装置の前段、前記再生装置の前段に前記偏波コンバータが備えられた場合には前記偏波コンバータの前段、又は、前記前記偏波コンバータの前段に前記分波装置が備えられた場合には前記分波装置の前段に、分散補償器が備えられた光再生システムである。

本発明の光再生システムの他の態様は、前記再生装置の出射側に、前記再生装置により再生された信号光と他の信号光とを合波する合波装置が備えられた光再生システムである。

本発明の光再生システムの他の態様は、前記再生装置が多段に接続された光再生システムである。

本発明の光再生システムの他の態様は、多段に接続された前記再生装置の間に光スイッチが備えられた光再生システムである。

本発明の光再生システムの他の態様は、前記再生装置の前段で入力パワーの調整を行なう光再生システムである。

本発明の波形整形器の第1の態様は、ファイバ長がソリトン周期の2倍以下である異常分散ファイバ(Anomalous-dispersion fiber: ADF)を有するソリトンコンバータが備えられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記異常分散ファイバの後段に光フィルタが備えられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記異常分散ファイバの前段に光増幅器が備えられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、ソリトンコンバータの代わりに、Mamyshevフィルタ又はNOLMが備えられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、入射側にパルス圧縮器が備えられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記パルス圧縮器は、断熱圧縮方式を利用した波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記パルス圧縮器に、光ファイバの長手方向に分散特性が減少する分散減少ファイバが用いられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記パルス圧縮器に、光ファイバの長手方向に分散特性がステップ状のプロファイルを持つSDPFが用いられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記パルス圧縮器に、光ファイバの長手方向に分散特性が櫛状のプロファイルを持つCDPFが用いられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記パルス圧縮器に、長手方向に非線形特性が増大する光ファイバが用いられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記パルス圧縮器に、長手方向に非線形特性がステップ状のプロファイルを持つ光ファイバが用いられた波形整形器である。

。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記パルス圧縮器に、長手方向に非線形特

性が櫛状のプロファイルを持つ光ファイバが用いられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記パルス圧縮器に、ラマン増幅器が備えられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、ソリトンコンバータの代わりに、可飽和吸収特性を持つ可飽和吸収体を用いられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記可飽和吸収体の位置を調整して、可飽和吸収特性を可変にする位置調整機構が備えられた波形整形器である。

本発明の波形整形器の他の態様は、前記可飽和吸収特性が面内分布を有する波形整形器である。

本発明のカーシャッタの第1の態様は、分波器と、OPLL(Optical Phase-Locked Loop)と、光スイッチ部と、が備えられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記OPLLにおけるビートレートの差を $\Delta\omega$ 、ループ長を $L_{L.O.P.}$ とし、 v を光ファイバ中の光の速度、前記分波器と前記光スイッチ部とを接続したファイバの長さを L_{A-B} 、 n を光ファイバの屈折率、 X を任意の数とすると、 $L_{L.O.P.}$ は、 $\Delta\omega(L_{L.O.P.}) < v \cdot X / n \cdot L_{A-B}$ の関係が成り立つように決定されることを特徴とするカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記OPLLに、光LO信号を発生させる光LO発生器と、外部から入力される信号光と前記光LO信号の位相差を検出する位相比較器と、前記位相差に基づき前記光LO信号の周波数を調整する制御部と、が備えられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記光位相比較器に、FWM光を発生させるFWM部と、光フィルタと、受光部が備えられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記FWM部に、高非線形光ファイバ、PPLN(Periodically-poled LiNbO₃) 又はSOA(Semi-conductive Optical Amplifier)のいずれかが用いられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記受光部は、前段にパルスローラが配置され、該受光部に入射されたパルスの周波数特性をモニタすることを特徴とする記載のカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記LO発生器に、ビート光発生器が備えられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記ビート光発生器は、CW光を発生する2つ以上の周波数成分を持つ1台以上の半導体レーザと、前記CW光を合波する光カップラーと、が備えられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記半導体レーザが直列駆動されたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記ビート光発生器と前記光スイッチ部との間に、光ファイバ圧縮器が備えられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記位相比較器に、PD (Photo Diode) と、Loop Filterと、LDコントロール部が備えられ、該PDは、二光子吸収によって光電流が発生することを特徴とするカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記PDは、シリコンアバランシェフォトダイオード (SiAPD) が用いられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記光スイッチ部に、FWM部と、光フィルタと、位相調整部と、が備えられたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記位相調整部が、環境温度の変化に対して位相調整量が変わらないように制御されたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記位相調整量が、出力パルスに基づいてフィードバック制御されるカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記FWM部において、ポンプ光と信号光の周波数間隔 $\Delta\nu$ (離調量) と、入力ポンプパルスのスペクトル幅を $\Delta\nu_p$ と、入力信号パルスのスペクトル幅 $\Delta\nu_s$ 、の間に下式の関係の有するカーシャッタである。

$$\Delta\nu > \frac{|\Delta\nu_p + \Delta\nu_s|}{2}$$

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記FWM部において、ファイバ長 ΔL と、入力ポンプパルスのスペクトル幅を $\Delta\nu_p$ と、入力信号パルスのスペクトル

幅 $\Delta \nu_s$ 、の間に下式の関係性を有するカーシャッタである。

$$\Delta L > \Delta \nu_p + (\Delta \nu_s / 2)$$

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記FWM部において、ファイバ長Lが下式により定められるカーシャッタである。

$$1 < \frac{L}{L_{NL}} = \gamma P_0 L$$

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記FWM部において、ファイバ長Lが下式により定められるカーシャッタである。

$$\frac{L}{L_{SOD}} < \frac{1}{2}, \frac{L}{L_{TOD}} < \frac{1}{2}$$

$$\beta_3 < \frac{1.7628^3}{2} \frac{\Delta t_p^3}{L}$$

$$\beta_3 < \frac{1.7628^2}{4\pi} \frac{\Delta t_s^2}{L \Delta \nu}$$

本発明のカーシャッタの他の態様は、

Pumpパルス ($\Delta t_p, \Delta \nu_p$) とSignalパルス ($\Delta t_s, \Delta \nu_s$) において、

$$\Delta \nu > \frac{|\Delta \nu_p + \Delta \nu_s|}{2}$$

の式を用いて、スペクトル重なりを回避するための離調量 $\Delta \nu$ を定める行程と、
 $2 \Delta \nu$ 以上のFWM帯域が得られるファイバ長Lを定める行程と、

$$1 < \frac{L}{L_{NL}} = \gamma P_0 L$$

$$\gamma P_p L \leq \frac{3\pi}{2}$$

の式を用いて、スペクトル波形歪が無くFWMを発生させるポンプピークパワー P_p

を定める行程と、

$$\beta_3 < \frac{1.7628^3}{2} \frac{\Delta t_p^3}{L}$$

$$\beta_3 < \frac{1.7628^2}{4\pi} \frac{\Delta t_s^2}{L\Delta\nu}$$

の式を用いて、ファイバ伝搬に伴うパルス時間波形歪抑制に必要な3次分散値 β_3 を定める行程と、

を備えた手順で設計されたカーシャッタである。

本発明のカーシャッタの他の態様は、前記光位相比較器に備えられたFWM部と、前記光スイッチ部に備えられたFWM部とが共有され、更に、光LO発生器と、制御部と、が備えられたカーシャッタである。

本発明のパルスローラの第1の態様は、高非線形特性を有するパルスローラファイバが備えられたパルスローラである。

本発明のパルスローラの他の態様は、前記パルスローラファイバが、長手方向に正常分布値が増大する特性を持つ正常分散増大ファイバであるパルスローラである。

本発明のパルスローラの他の態様は、前記パルスローラファイバは、長手方向に非線形値が減少する特性を持つ光ファイバであるパルスローラである。

本発明のパルスローラの他の態様は、前記パルスローラファイバは、長手方向に正常分散特性と非線形特性が異なる2種類以上の光ファイバを組合せた分散マネージメント光ファイバからなるパルスローラである。

本発明のパルスローラの他の態様は、前記分散マネージメント光ファイバで、長手方向に分散効果が支配的な光ファイバと、長手方向に非線形効果が支配的な光ファイバとが配置されたパルスローラである。

本発明のパルスローラの他の態様は、前記分散マネージメント光ファイバで、前記分散効果が支配的な光ファイバの分散特性と前記非線形効果が支配的な光ファイバの非線形特性とが、ステップ状のプロファイルとなるように配置されたパルスローラである。

本発明のパルスローラの他の態様は、前記分散マネージメント光ファイバで、前記分散効果が支配的な光ファイバの分散特性と前記非線形効果が支配的な光ファイバの非線形特性とが、櫛歯状のプロファイルに変化するように配置されたパルスローラである。

本発明のOTDM信号発生器の第1の態様は、パルスローラと、光スイッチ部とが備えられたOTDM信号発生器である。

本発明のソリトンピュリファイアの第1の態様は、ソリトンファイバが2つの光フィルタの間に配置されたソリトンピュリファイアである。

本発明のソリトンピュリファイアの他の態様は、前記ソリトンファイバにおいて、誘導ラマン散乱による利得の傾き（利得スロープ）が制御され、ソリトンの波長シフトを実現するソリトンピュリファイアである。

本発明のソリトンピュリファイアの他の態様は、前記ソリトンファイバが、高非線形ファイバであるソリトンピュリファイアである。

本発明のソリトンピュリファイアの他の態様は、外部ポンプ光を発生するポンプ光発生器が備えられ、前記外部ポンプ光により誘導ラマン散乱を発生させるソリトンピュリファイアである。

本発明のソリトンピュリファイアの他の態様は、入射側に更にパルス圧縮器が備えられたソリトンピュリファイアである。

本発明のソリトンピュリファイアの他の態様は、ソリトン断熱圧縮を行いながら、誘導ラマン散乱を発生させるソリトンピュリファイアである。

本発明のソリトン雑音の制御方法の第1の態様は、光ソリトン列を用いた光非線形信号処理において、Duty比（パルス幅に対するパルス間隔の比）と分散距離によって、所定の雑音増幅利得における最大伝搬距離を定めるソリトン雑音の制御方法である。

本発明のソリトン雑音の制御方法の他の態様は、変調方法としてCS-RZパルス列を用いたソリトン雑音の制御方法である。

本発明の光伝送システムの第1の態様は、光再生システムが直列に多段接続された光伝送システムである。

図面の簡単な説明

図 1 は、本発明に係る第 1 実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である。

図 2 は、図 1 の再生システムに含まれる再生装置 1 5 の概略構成図である。

図 3 は、図 2 の再生装置 1 5 に含まれるクロック再生装置 2 1 の概略構成図である。

図 4 は、図 2 の再生装置 1 5 に含まれる他のクロック再生装置 2 1 の概略構成図である。

図 5 は、図 2 の再生装置 1 5 に含まれる波形再生装置 1 9 の概略構成図である。

。

図 6 は、図 2 の再生装置 1 5 に含まれる他の波形再生装置 1 9 の概略構成図である。

図 7 は、図 1 の再生システムに含まれる偏波コンバータ 1 3 の概略構成図である。

。

図 8 は、図 1 の再生システムに含まれる他の偏波コンバータ 1 3 の概略構成図である。

図 9 は、図 1 の再生システムに含まれるまた他の偏波コンバータ 1 3 の概略構成図である。

図 1 0 は、図 7 の偏波コンバータ 1 3 の一形態の概略構成図である。

図 1 1 は、図 7 の偏波コンバータ 1 3 の他の形態の概略構成図である。

図 1 2 は、図 7 の偏波コンバータ 1 3 の更に他の形態の概略構成図である。

図 1 3 は、本発明に係る第 2 実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である。

図 1 4 は、本発明に係る第 3 実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である。

図 1 5 は、本発明に係る第 4 実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である。

図16は、本発明に係る第5実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である。

図17は、本発明に係る再生装置の一構成図である。

図18は、図17のsoliton converterの一構成図である

図19は、図17のsoliton converterの他の形態を示す概略構成図である

図20Aは、soliton converterからの出力パルスの光信号雑音比OSNRを示すグラフである。

図20Bは、スペクトル線幅増大率 $\Delta \nu / \Delta \nu_{in}$ のソリトン次数N依存性を示すグラフである。

図21は、soliton converterからの出力パルス自己相関波形幅 Δt_{Ac} の入力パワー P_{in} 依存性を示す。左部のグラフは出力光フィルタの入力前、右部のグラフは出力光フィルタの出力後の出力パルス自己相関波形幅 Δt_{Ac} である。

図22は、左のグラフは、0、20、40及び80 m長のSMF伝搬後のパルスであり、中央のグラフ及び右のグラフは P_{in} の調整を行った場合のsoliton converterからの出力パルスの自己相関波形である。中央のグラフは出力光フィルタの入力前であり、右部のグラフは出力光フィルタの出力後を示す。

図23は、soliton converterにおける出力ソリトンの自己相関幅 Δt_{Ac} 及びOSNRの P_{in} の依存性を示すグラフである。

図24は、Kerr-shutterの一構成図である。

図25Aは、はLDペアの独立駆動時のタイミングジッタ特性を示すグラフである。

図25Bは直列駆動時のタイミングジッタ特性を示すグラフである。

図26Aは、光受光部の一構成図である。

図26Bは図25Aの変形例である。

図26Cは図26Aの更なる変形例である。

図27は、Kerr-shutterの他の構成図であり、位相比較部と光スイッチ部のFWMファイバを融合化させた一例を示す。

図28は、pulse rollerの一構成図である。

- 図 2 9 A は、は正常分散増大ファイバの分散プロファイルである。
- 図 2 9 B はステップ状分散プロファイルファイバの分散プロファイルである。
- 図 2 9 C は櫛状分散プロファイルファイバの分散プロファイルを示す。
- 図 3 0 A は、は pulse roller の一構成図であり、パルス矩形化実験伝送路を示す。
- 図 3 0 B は図 3 0 A の pulse roller ファイバの分散プロファイルを示す。
- 図 3 1 は、図 3 0 A, B におけるパルス伝搬シミュレーションの結果を示すグラフである。
- 図 3 2 は、pulse roller と光スイッチ部から成る時間再生装置或いは時間分割装置の一構成図である。
- 図 3 3 は、pulse roller と O P L L を組合せたクロック抽出器の一構成図である。
- 図 3 4 A, B は、は、pulse roller からの出力パルスの時間波形とチャープ特性を示す。
- 図 3 5 A, B は、位相差を認識するための光受光部を示す。
- 図 3 6 A は、soliton purifier の一構成図である。
- 図 3 6 B は、soliton purifier に H N L F を使用した一実施例を示す。
- 図 3 6 C は、soliton purifier にラマン増幅を利用した一実施例を示す。
- 図 3 7 は、ソリトン帯域での利得スロープを説明するグラフである。
- 図 3 8 は、従来の時間再生技術に関する説明図である。
- 図 3 9 A, B は、従来のパルス矩形化技術の説明図である。
- 図 4 0 A は、従来の雑音除去装置の構成図である。
- 図 4 0 B は、雑音除去のメカニズムを示すグラフである。
- 図 4 1 A は、入力パルスを示す波形図である。
- 図 4 1 B ~ D は、図 4 1 A が矩形パルスへ変換した波形図である。
- 図 4 2 は、パルス強度と瞬時周波数の関係を示す波形図である。
- 図 4 3 は、本発明に係る再生システムの一構成図である。
- 図 4 4 は、本発明に係る再生システムの一構成図である。

図 4 5 は、本発明に係る再生装置の一構成図である。

図 4 6 は、本発明に係る再生装置を利用した再生システムを示す一構成図である。

。

図 4 7 は、可飽和吸収体の入力光強度と出力光強度の関係を示すグラフである。

図 4 8 は、可飽和吸収体を利用したデバイスの一構成図である。

図 4 9 は、図 4 8 のデバイスの変形例を示す一構成図である。

図 5 0 は、図 4 8 のデバイスの更なる変形例を示す一構成図である。

図 5 1 A は、横軸を時間で示した場合の F W M における入力パルスと出力パルスを示す図である。

図 5 1 B は、横軸を周波数で示した場合の F W M における入力パルスと出力パルスを示す図である。

図 5 2 は、F W M に必要な帯域幅とファイバの長さの関係を示したグラフである。

。

図 5 3 は、F W M における最適なファイバ長を決定するための一設計手法を説明したフロー図である。

図 5 4 は、図 5 3 のフロー図によりファイバ長が最適化され、F W M による波長変換を行った実験構成図である。

図 5 5 は、図 5 4 の実験による入出力パルス波形を示すグラフである。

図 5 6 は、図 5 4 の実験による入出力時の自己相関波形を示すグラフである。

図 5 7 は、F W M と S P M を用いた波形整形器の一構成図である。

図 5 8 は、波形整形器でのパルス波形を示すグラフである。

図 5 9 は、図 5 7 の波形整形器における入力ポンプパワーと出力 F W M パワーの関係を示すグラフである。

図 6 0 A は、F W M 部に光ファイバを用いずに位相差を検出するための一構成例である。

図 6 0 B は F W M 部の変形例を示す。

図 6 1 は、O P L L 動作における矩形パルスの振幅を時間的に変化させる方法を説明するグラフである。

図62は、本発明に係るOTDM信号発生器の一構成図である。

図63は、ラマン増幅器による増幅利得とソリトンのスペクトルの関係を示した説明図である。

図64は、雑音増幅のピーク利得を、ビットレートと、伝搬距離に対して数値計算により求めたグラフである。

図65は、図64において、繰り返し周波数を320GHz、伝搬距離を1kmとした場合の出力パルス列のスペクトルを示したグラフである。

図66は、非線形効果を利用したデバイスの偏波保持を示した一構成図である。

図67は、繰り返し周波数が160GHzで、半値幅が1psの光ソリトン列を2kmのHNLFに伝搬させた際の入力および出力スペクトルを表したグラフである。

図68は、図24に示したKerr-shutterの変形例であり、最初の分波器から光スイッチ部までのファイバ長が、OPLL部を介した場合と、直接の場合とではほぼ同じ長さであることを示した構成概略図である。

図69は、図67で使用したHNLFの長さ（距離）と分散値の関係を示すグラフである。

図70は、図1に示した再生システムを直列的に多段接続させた光伝送システムを示す構成概略図である。

発明を実施するための最良の形態

本発明では、劣化した信号光を含む波長分割多重光は、後述するように非線形光学効果を利用して再生される。そこで、まず、非線形光学効果について説明する。

非線形光学効果は、非線形光学定数が高い媒質（以下、非線形光学媒質ともいう）に強度の大きな光が入射したときに顕著に発生する。詳しくは、非線形光学定数が高い媒質としては、例えば、ゲルマニウム、フッ素、希土類元素等をドープした光ファイバ（以下、高非線形ファイバともいう）、LiNbO₃等の強誘電体、及び半導体等があげられる。また強度の大きな光としては、信号光自体、又

は、信号光とは別にこの効果を発生させるために用意された一つ若しくは二つ以上の制御光若しくは励起光があげられる。

非線形光学効果が生じた場合、例えば、この媒質に入射している信号光の波形形状の変化若しくはその位相の変調が生じる。また、制御光若しくは励起光と周波数の異なる高調波又は差周波若しくは和周波が発生する。このような非線形光学効果としては、自己位相変調（以下、SPMという）、相互位相変調（以下、XPMという）若しくは四光波混合（以下、FWMという）、ラマン増幅、パラメトリック増幅、ソリトン効果及びスーパーコンティニューム効果（以下、SCという）等が挙げられる。

ここで、非線形光学効果の大きさ、例えば、周波数変調の程度や発生した高調波の強度は、入射した光の強度に対して非線形である。

そして、非線形光学効果の大きさは、偏波依存性を有する。例えば、強度の大きな光が無偏光ではなく、ある偏光状態を有し、かつ、この強度の大きな光の入射方向と直交する面内において非線形光学媒質が異方性を有する場合を考える。この場合、非線形光学効果の大きさは、この光の偏光状態と媒質の相対方位に依存するという偏波依存性を有する。また、媒質にこのような異方性がない場合であっても、非線形光学効果の大きさは、強度の大きな光が制御光若しくは励起光であるときには、信号光の偏光状態と、制御光若しくは励起光の偏光状態との相対関係に強く依存する。

以下、図面に基づき本発明の実施形態を説明する。

図1は、本発明に係る第1実施形態の波長分割多重光再生システム1（以下、再生システム1という）を示している。

再生システム1は、波長分割多重通信システムに組み込まれた状態、例えばこの光伝送システムの一部を構成する光ファイバ4と光ファイバ6との間に介挿さ

れた状態で使用される。

そして、再生システム 1 は、波長分割多重光に含まれている信号光であって、波長分割多重光が波長分割多重通信システムの伝送路中を伝搬することによって劣化した信号光を、伝搬する以前の状態、例えば発信器から出射した直後の状態へと復元もしくは再生する。なお、信号光の劣化とは、例えば、信号光の強度、位相、周波数、偏光状態またはこれらのうち複数が所定の許容範囲を超えて変化することをいう。

再生システム 1 は分波装置 8 と合波装置 10 とを備えている。

分波装置 8 は、一つの入射ポート 8 a と複数の出射ポートとを有し、この入射ポート 8 a には光ファイバ 4 が接続されている。光ファイバ 4 から入射ポート 8 a を介して分波装置 8 に入射した波長分割多重光は、複数の信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n へと分波される。そして各信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n は、それぞれ、波長毎に異なる分波装置 8 の出射ポートから出射する。ただし、分波する前に伝送路分散によって付加されたチャープを補償する為の分散補償器 300 があるのが好ましい。この形態を図 43 に示す。分散補償器の例としては、ファイバブラッググレーティングを利用したモジュール、エタロンを利用したモジュール、DCF (Dispersion shifted fiber) モジュール、プリズム対とグレーティングを利用したモジュールなどの一般的に利用されているものが適用できる。なお、上述した分散補償器 300 は、固定型、可変型のどちらでも構わないが、可変型である方が、チャープ補償の範囲が広がるため、好都合である。

一方、合波装置 10 は、複数の入射ポートと一つの出射ポート 10 a とを有し、この出射ポート 10 a には光ファイバ 6 が接続されている。各入射ポートを介して合波装置 10 に入射した信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n は、合波されて波長分割多重光となり、出射ポート 10 a を介して光ファイバ 6 へと伝搬する。

なお、これら分波装置 8 及び合波装置 10 は共に、例えばアレイ導波路回折格子、フィルター型合分波器、FBG (Fiber Bragg Grating) 型合分波器により構成することができる。

分波装置 8 と合波装置 10 との間には、複数の光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 \dots 12_n が延びており、各光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 \dots 12_n の両端は、分波装置 8 の出射ポートと合波装置 10 の入射ポートに接続されている。

これら光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 \dots 12_n のうち少なくとも一つの光路 12_1 には、分波装置 8 側から順に、偏波コンバータ 13 と、光信号再生装置 15 (以下、再生装置 15 と記述する) とが介挿されている。

再生システム 1 においては、光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 \dots 12_n のうち、どの光路に上記した偏波コンバータ 13 及び再生装置 15 を介挿するかという点については、各光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 \dots 12_n を伝搬する信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n の劣化の程度に応じて適宜決定することができる。なお、偏波コンバータ 13 を含まない図 44 の形態も可能である。

各光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 \dots 12_n は、例えば、シングルモードファイバー若しくは分散シフトファイバ等の光ファイバ、光導波路、空間、又はこれらの組み合わせにより構成することができる。しかしながら、光路 12_1 のうち、偏波コンバータ 13 と再生装置 15 との間を延びる部分については、後述する理由により、そこを伝播する光の偏光状態を保持することが可能な偏波保持型導波路 $12a$ で構成することが好ましい。このような偏波保持型導波路 $12a$ としては、例えば、偏波保持光ファイバ、半導体光導波路、及びガラス製平面形導波路などをあげることができる。

偏波コンバータ 13 へ入射した信号光 λ_1 は、この偏波コンバータ 13 におい

て、その偏光状態が後述する再生装置 15 による再生処理に適した所望の偏光状態、例えば直線偏光へと偏光変換された後、偏波コンバータ 13 から出射する。

ところで、偏波コンバータ 13 に入射する時点において、信号光 λ_1 は、自らの波長、または、発信器で生成されてから偏波コンバータ 13 に入射するまでの伝搬光路の長さ、種類もしくは状態等に対応したある偏光状態を有している。すなわち、信号光 λ_1 は、光路の波長分散、偏波モード分散（光弾性効果によるものも含む）等に応じた偏光状態を有している。

偏波コンバータ 13 は、このように様々かつ不確定な要因に基づきあらゆる偏光状態を取り得る信号光 λ_1 に対して偏光変換を施し、その偏光状態を所望の偏光状態へと変換する。すなわち、偏波コンバータ 13 は、そこに入射した時点における信号光の偏光状態に依存することなく、所望の偏光状態の光を出射させるものであって、任意の偏光状態を所望の偏光状態へと偏光変換する機能を有している。

偏波コンバータ 13 から出射された信号光 λ_1 は、偏波保持型導波路 12 a を伝搬して再生装置 15 へ入射される。

ここにおいて、偏波保持型導波路 12 a を伝搬する信号光は、その偏光状態を維持したまま伝搬することができる。よって、偏波コンバータ 13 を出射した信号光 λ_1 は、その偏光状態を維持したまま再生装置 15 へと入射することができる。

より具体的に説明すると、偏光変換後の信号光 λ_1 が直線偏光であり、また、偏波保持型導波路 12 a として偏波保持光ファイバを用いた場合には、信号光の偏光面と偏波保持光ファイバの主軸、すなわち進相軸若しくは遅相軸とを一致させることにより、偏波コンバータ 13 と再生装置 15 との間で、信号光 λ_1 の偏光状態は保存される。

ただし、前述のとおり偏波保持型導波路 12a を用いなくとも偏波が保持される状況であれば、通常の導波路でも構わない。例えば、偏波コンバータ 13 と再生装置 15 との間の光路 12₁ の長さを短くすることによっても、それらの間で信号光 λ_1 の偏光状態の保存もしくはその変化を抑制することができる。

さらに、偏波コンバータ 13 と再生装置 15 との間の光路 12₁ が偏波保持型導波路 12a ではない場合であっても、この光路 12₁ の複屈折が既知であれば、その複屈折を考慮して偏波コンバータ 13 の偏光変換の設定を行なうことにより、所望の偏光状態の信号光 λ_1 を再生装置 15 へ入射させることができる。

再生装置 15 は、入射した信号光 λ_1 に非線形光学効果を利用した再生処理を施して信号光 λ_1 を再生する。

再生装置 15 から出射し、光路 12₁ を伝搬した信号光 λ_1 は、合波装置 10 へとその入射ポートを介して入射する。一方、合波装置 10 には、その他の光路 12₂、12₃、…12_n を伝搬してきた信号光 λ_2 、 λ_3 、… λ_n もそれぞれ互いに異なる入射ポートを介して入射している。合波装置 10 は、信号光 λ_1 を含むこれらの信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n を合波して波長分割多重光とし、出射ポート 10a から出射させる。

なお、図 70 に示すように、上述した再生システム 1 を、任意の間隔で直列的に多段接続させた光伝送システムを構築してもよい。実際に光伝送システムとして再生システム 1 が配置される場合、図 70 のような構成となる。つまり、伝送される光ファイバ 4 もしくは光ファイバ 6 の特性の影響、もしくは伝送速度により信号光は劣化されるが、この劣化を再生すべき場所に再生システム 1 を配置できればよい。特に、長距離区間で信号光を伝搬させる場合、図 70 に示した光伝送システムは有効である。

以下では、上記した再生システム1を用いた、波長分割多重光再生方法A（以下、方法Aという）を、図1を用いて説明する。

方法Aは、分波工程と、偏光変換工程と、再生工程とを備える。

まず、分波工程において、分波装置8が波長分割多重光を波長毎に複数の信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n に分波する。

その後、偏光変換工程において偏波コンバータ13が、分波工程で得られた複数の信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n のうち、少なくとも1つの信号光 λ_1 に偏光変換を施す。この偏光変換は、信号光 λ_1 の偏光状態を、再生装置15において所望の非線形光学効果の発現に適合した偏光状態、若しくは、再生装置15において信号光がもっともよく再生される偏光状態へと偏光変換する。

そして、再生工程において再生装置15が、偏光変換工程で偏光変換された信号光 λ_1 に対して非線形光学効果を利用した再生処理を施す。

これらの再生システム1及び方法Aは、以下の作用を有する。

波長分割多重光に含まれる互いに波長の異なる複数の信号光は、波長分割多重光が例えば通信システム中の発信器から出射してこの通信システム中を伝搬した後では、それらの偏光状態は波長に応じて互いに異なっている。そのため、波長の異なる複数の信号光を、非線形光学効果を利用した再生装置にて一括して再生した場合、その波長毎に、信号光の再生の程度が異なってしまう。すなわち、ある一つの波長の信号光は良好に再生できたが、他の波長の信号光は再生されなかったという場合が起こり得る。

そこで、再生システム1及び方法Aにあつては、信号光の偏光状態が波長依存性を有していること、ならびに、非線形光学効果を利用した信号光の再生の程度は、信号光の偏光状態と、制御光若しくは励起光の偏光状態との相対関係に強く

依存することを考慮する必要がある。このため、まず、波長分割多重光を波長毎に複数の信号光へと分波して、それぞれの信号光を独立化して扱う。そしてその上で、再生装置 15 による再生処理が必要な信号光の偏光状態を、信号光の再生装置 15 への入射に先立って再生に適合する偏光状態に調整する。

これにより、再生システム 1 及び方法 A は、再生処理が必要な信号光を、発信器から出射した直後の状態、もしくは劣化前の信号光の状態へと忠実に再現することができる。その結果、再生された信号光を含む波長分割多重光の波形を良好に再生することができる。

更に、再生システム 1 及び方法 A においては、信号光は電気信号に変換されることなく再生されるので、伝送容量が電気デバイス等によって制限されない。そのため、再生システム 1 及び方法 A によれば、各波長（チャンネル）の信号光の伝送速度を 40Gbit/s を超えて高めることが可能であり、波長分割多重光のチャンネル数を減らすことができる。その結果、再生システム 1 は、従来に比べて少ない再生装置 15 で構成されるので、その小型化及び省電力化が可能である。

以下では、再生装置 15 について詳述する。

再生装置 15 は、図 2 に示したように、増幅装置 17、波形再生装置 19、クロック再生装置 21 及び雑音除去装置 23 を含む。

再生装置 15 は、再生システム 1 に求められる再生能力に応じて、光増幅装置 17、波形再生装置 19、クロック再生装置 21 及び雑音除去装置 23 よりなる群のうちから選択された一つ又は二つ以上を含む。また、その選択された装置は、非線形光学効果を利用して再生処理を行なうものである。また、これら増幅装置 17、波形再生装置 19、クロック再生装置 21 及び雑音除去装置 23 の配列は、限定されることはなく、必要に応じて適宜変更することが可能である。例え

ば、波形再生装置 19 の前段にクロック再生装置 21 を配置してもよい。

ここで、増幅装置 17 は減衰した信号光を増幅し、波形再生装置 19 は信号光の波形を再生し、クロック再生装置 21 は信号光のクロック再生を行ない、そして、雑音除去装置 23 は信号光に含まれる雑音を除去する。

なお、増幅装置 17 により増幅され、雑音として自然放出光（無偏光）を含む信号光であっても、偏光子を透過させることにより、信号光に含まれる雑音を半減させることができる。すなわち、増幅装置 17 と偏光子とを組み合わせたものは、雑音除去装置 23 として用いることができる。

増幅装置 17 としては、例えば、エルビウム添加ファイバ型増幅器、ラマン増幅器、半導体光増幅器、パラメトリック光増幅器等をあげることができる。

ラマン増幅器では、そこに入射される信号光と、励起光との間における偏光状態の相対関係にラマン利得が依存する。再生システム 1 においては、所望のラマン利得を得るのに適した偏光状態へと、偏波コンバータ 13 が信号光を予め偏光変換するので、ラマン増幅器は安定して信号光を増幅することができる。

ラマン増幅器と同じように、半導体光増幅器やパラメトリック光増幅器もそれぞれの利得に偏光依存性がある。再生システム 1 においては、所望の利得を得るのに適した偏光状態へと、偏波コンバータ 13 が信号光を予め偏光変換するので、半導体光増幅器やパラメトリック光増幅器は安定して信号光を増幅することができる。

クロック再生装置 21 は、非線形光学効果として、例えば、XPM 若しくは FWM を利用するものがあげられる。

前者の（XPM を利用する）クロック再生装置 21 としては、図 3 に例示した

ものがある。このクロック再生装置 21 は、パルス状の制御光を出射する制御光発生装置 25 と、光学遅延手段 27 及び制御部 29 により制御光に対して信号光の位相を揃える位相同期手段 31 と、光カップラ 33 を介して光路に介挿され、制御パルス光と信号光とが伝搬して XPM が発生する高非線形ファイバ 35 と、高非線形ファイバ 35 に制御光を入射若しくはそこから出射させる WDM カプラ 37、39 とを備えている。また、このクロック再生装置 21 は、高非線形ファイバ 35 からの信号光の戻り光を防止するアイソレータ 41 と、光フィルター 43 を備えることが望ましい。

また、後者の（FWM を利用する）クロック再生装置 21 としては、図 4 に例示したものがある。このクロック再生装置 21 は、パルス状の励起光を出射する励起光出射装置 45 と、励起光に対して信号光の位相を揃える位相同期手段 31 と、合波器 47（例えば WDM カプラや 3 dB カプラ）を介して励起光と信号光とが入射して FWM が発生する非線形光学媒質 49 とを備える。このクロック再生装置 21 においては、非線形光学媒質 49 に入射した信号光が、FWM を用いて波長変換された信号光とともに非線形光学媒質 49 から出射するので、波長変換されていない信号光及び励起光は、光フィルタや、WDM カプラ 51 を用いて波長変換によって得られた信号光と分離される。

図 3 及び図 4 に示したクロック再生装置 21 は、高非線形ファイバ 35 若しくは非線形光学媒質 49 中における XPM や FWM を利用して信号光に対してクロック再生処理を施している。このようなクロック再生処理においては、得られる非線形光学効果が小さい場合、良好に信号光のクロック再生をすることができなくなる。そのため、信号光と、制御光若しくは励起光との間において、それぞれの偏光状態を所定の相対関係に維持し、得られる非線形光学効果の大きさを所定の大きさに維持する必要がある。

具体的には、クロック再生装置 21 に入射する信号光の偏光状態が直線偏光の

場合、励起光若しくは制御光の偏光面と信号光の偏光面とが互いに平行になるように、信号光の偏光状態を維持する。これにより、クロック再生装置 21 は、所定の程度にて信号光のクロック再生を行うことができる。

波形再生装置 19 には、非線形光学効果としてソリトン効果、又は、SPM 若しくは SC を利用するものがある。

前者の（ソリトン効果を利用する）波形再生装置 19 は、例えば図 5 に示したように、増幅装置 17a と、非線形光学媒質 53 と、光フィルター（バンドパスフィルター）55 とから構成されている。ここで非線形光学媒質 53 としては、高非線形ファイバおよび半導体素子があげられる。なお、図 5 では、波形装置 19 内に増幅装置 17a を配置させた例を示した。しかしながら、図 2 に示したように増幅装置 17 が配置され、この増幅装置 17 のみで波形再生装置 19 に入射する信号光の強度を十分に高めることが出来る場合は、増幅装置 17a を必ず配置させる必要はない。つまり、波形再生装置 19 内の増幅装置 17a は、必要に応じて配置させればよい。

図 5 の再生装置 19 においては、増幅装置 17a で強度が高められた信号光が非線形光学媒質 53 に入射し、この媒質中 53 中で発生するソリトン効果により、信号光に含まれる時間的な雑音成分が除去され、信号光の波形が再生される。

後者の（SPM 若しくは SC を利用する）波形再生装置 19 としては、図 6 に例示したものがある。この波形再生装置 19 は、増幅装置 17a と、非線形光学媒質 56 と、光フィルター 55 と、波長変換部 57 とから構成されている。なお、図 5 と同様の理由で、増幅装置 17a は必要に応じて配置される。

図 6 の波形再生装置 19 においては、増幅装置 17a で強度が高められた信号光が非線形光学媒質 53 に入射し、この媒質中 56 中で発生する SPM 若しくは

SCによって、時間的な雑音成分が除かれた信号光についてのみ波長帯が広げられる。

そして、この波長帯が広げられた信号光が光フィルター55へと入射し、所定の波長帯を有する信号光のみが光フィルター55を透過することにより、信号光の波形が再生される。波形が再生された信号光は、波長変換部57に入射して波長変換を施される。

ここで、波長変換部57による波長変換は、波形再生装置19から出射される信号光の波長帯を、媒質56にて広げられる前の波長帯に戻すためである。よって、波長帯を戻す必要がない場合には、波長変換部57を波形再生装置19に設ける必要はない。

波長変換部57には、非線形光学効果として、例えばFWM、XPMもしくはSPMを利用するものがある。これらのうち、FWM若しくはXPMを用いるものは、基本的に上記したクロック再生装置21と同じ構成を有する。したがって、波長変換部57はクロック再生装置21を兼ねることができ、図6に示した波形再生装置19の場合は、その出射側にクロック再生装置21を配置する必要はない。

また、波長変換部57にSPMを利用した場合は、増幅装置と、非線形ファイバと光フィルターによって構成することができる。

上述したように、波形再生装置19による信号光の波形再生処理は、媒質53、56、35、49中におけるSPM、XPM、FWM、ソリトン効果及びSC等の非線形光学効果を利用している。そして、XPMとFWMを利用した波形再生処理の場合には、制御光若しくは励起光の発生装置25、45から出射した制御光若しくは励起光と、信号光とを同一の媒質35、49に入射させることによりXPM若しくはFWMを発生させる。

このような波形再生処理においては、得られる非線形光学効果が大きすぎても小さすぎても良好に信号光の波形を再生することができなくなるおそれがある。そのため、信号光と、制御光若しくは励起光との間において、それぞれの偏光状態を所定の相対関係にて維持し、発生する非線形光学効果の大きさを所望の大きさに維持する必要がある。

雑音除去装置 23 は、波形再生装置 19 と同様に、増幅器、非線形光学媒質、および光フィルターなどで構成することができる。雑音除去装置 23 は、SPM や SC 等の非線形光学効果を用いて、信号成分の波長帯を広げた後、信号部分と雑音部分とを分離している。

なお、上記した波形再生装置 19、クロック再生装置 21、もしくは雑音除去装置 23 において用いられる制御光または励起光の発生装置としては、楕型分散配置（楕型分散プロファイル）を利用した光パルス光源、ファイバ型圧縮装置により圧縮された光パルス光源、スーパーコンティニューム光源、ソリトンパルス光源、ファイバーリングレーザのいずれかを用いるのが好ましい。なぜならば、これらの光源は、パルス時間幅が狭い高繰り返しパルスを発生させることが可能であって、更に、パルス時間幅及び繰り返しのパターンを、例えば信号光の周波数等を考慮して適宜設定することができるからである。

次に、図 7 を参照して、偏波コンバータ 13 について詳述する。

偏波コンバータ 13 は、上記したように、任意の偏光状態を所望の偏光状態へと偏光変換する機能を有するものであればよい。このような偏波コンバータ 13 は、少なくとも、入射した光（信号光）に対して偏光変換を施して所望の偏光状態とする偏光変換部 71 を備えている。

具体的には、制御光若しくは励起光が直線偏光である場合には、信号光の所望

の偏光状態としては、制御光若しくは励起光と偏光面が平行である直線偏光となるように、偏波コンバータ 13 で制御する。

そして、偏波コンバータ 13 は、図 7 に示すように、偏光変換部 71 に入射する信号光の偏光状態を検出し、この検出結果に基づき偏光変換部 71 をフィードフォワード制御する。あるいは、偏波コンバータ 13 は、図 8 に示すように、偏光変換部 71 から出射した信号光の偏光状態を検出し、この検出結果に基づき偏光変換部 71 をフィードバック制御する。このため、図 7 および図 8 に示すように、偏波コンバータ 13 は、検出部 73 及び制御部 75 を備えているのが好ましい。その理由は、信号光を所望の偏光状態へと確実に偏光変換することができるからである。

具体的に説明すると、検出部 73 としては、光分配器 77 により分波された信号光の偏光状態及び強度を検出可能な偏波アナライザ若しくは強度のみを検出可能なパワーメータ等があげられる。また、制御部はコンピュータにより構成することができる。

次に、図 9 を参照し、入射した信号光を直線偏光へと変換する偏波コンバータであって、検出部及び制御部を備えていない一構成例を示す。

この偏光変換部 71 は、入射した信号光を偏光面が互いに直交する 2 つの偏光へと分離する偏光分離素子 79 と、これらの 2 つの偏光を合波する合波器 81 とを備えている。そして、これら偏光分離素子 79 と合波器 81 との間には、2 つの光路が延びており、そのうち一方の光路にのみ $\lambda/2$ 波長板 83 が介挿されている。

この偏光変換部 71 に信号光が入射すると、偏光分離素子 79 により分離された偏光のうち、一方の偏光は、図中矢印で示したように紙面と平行な偏光面のま

ま合波器 8 1 へと入射される。一方、紙面と垂直な偏光面を有する他方の偏光は、 $\lambda/2$ 波長板 8 3 を通過することによりその偏光面が 90° 回転させられて合波器 8 1 へと入射する。したがって、合波器 8 1 に入射した時点においては 2 つの光路を伝搬してきた各偏光の偏光面は揃っており、これら偏光が合波器 8 1 において合波されることにより得られる信号光は、必ず直線偏光となる。

また、図 1 0 は、入射した信号光を直線偏光へと変換する偏波コンバータであって、偏光変換部 7 1 をフィードバック制御するための検出部 7 3 及び制御部 7 5 を備えたものを示している。

この偏光変換部 7 1 は、入射した信号光を偏光面が互いに直交する 2 つの偏光へと分離する偏光分離素子 7 9 と、これら 2 つの偏光を合波する合波器 8 1 とを備えている。そして、これら偏光分離素子 7 9 と合波器 8 1 との間には、2 つの光路が延びており、そのうち一方の光路には $\lambda/2$ 波長板 8 3 が介挿され、他方の光路には、光学光路長を可変とするための光学遅延手段 8 5 が介挿されている。

また、合波器 8 1 の出射側には、入射した信号光を所定の強度比で 2 つの光へ分光する光分配器 7 7 が配置されている。光分配器 7 7 の一方の出射側には、検出部 7 3 として、信号光を受光してその強度を測定するパワーメータが配置されている。そして、コンピュータ等からなる制御部 7 5 は、検出部 7 3 の検出結果から信号光の強度を制御するために、検出部 7 3 と電氣的に接続されている。その一方で制御部 7 5 は、検出部 7 3 から入力される検出結果、すなわち検出部 7 3 で検出する信号光の強度が最大となるように、光学遅延手段 8 5 を介して他方の光路の光学光路長を可変制御するために、光学遅延手段 8 5 とも電氣的に接続されている。

更に、図 1 1 は、入射した信号光を、直線偏光に限らず任意の偏光状態を有す

る信号光へと変換する偏波コンバータであつて、偏光変換部 7 1 をフィードバック制御するための光分配器 7 7、検出部 7 3 及び制御部 7 5 を有するものを示している。

この偏波コンバータの偏光変換部 7 1 は、コリメータ 8 6、8 7 間を延びる信号光の光路上に順に配置された $\lambda/4$ 波長板 8 9 と、 $\lambda/2$ 波長板 9 1 と、 $\lambda/4$ 波長板 9 3 と、これら波長板の光軸を回転軸として回転させるために各波長板に装着された回転手段 9 5、9 7、9 9 とからなる。すなわち、この偏光変換部 7 1 においては、回転手段 9 5、9 7、9 9 によつて波長板 8 9、9 1、9 3 を回転させることにより、信号光の偏光状態に対する各波長板 8 9、9 1、9 3 の進相軸及び遅相軸の方位が可変である。

検出部 7 3 は信号光の偏光状態として例えばストークスパラメータを求めることが可能な偏波アナライザーからなり、制御部 7 5 はこのストークスパラメータが所望の値となるように各回転手段 9 5、9 7、9 9 の回転角を調節する。したがつて、図 1 1 に示す偏波コンバータによれば、任意の偏光状態を有する光を、所望の偏光状態へと偏光変換することができる。

なお、図 1 1 の偏波コンバータにおいて、偏光変換部 7 1 が信号光を直線偏光へと偏光変換する場合には、図 1 2 に例示したように、再生装置 1 5 による再生処理に適した直線偏光を透過させるように、偏光変換部 7 1 の出射側に直線偏光子 1 0 1 を配置し、かつ、検出部 7 5 は信号光の強度を検出するパワーメータとするのが好ましい。

その理由は、信号光 λ_1 が偏光子 1 0 1 を通過することにより、信号光の偏光度を高めることができ、再生装置 1 5 による再生の程度を一層安定させることができるからである。また、後述するように偏波コンバータ 1 3 の入射側に光増幅器 1 0 5 が配置された場合（図 1 3 を参照）には、この光増幅器 1 0 5 にて増幅

された雑音、すなわち、信号光 λ_1 に付加された無偏光である自然放出光が除去され、信号光 λ_1 の信号雑音比を向上させることができるからである。

なお、偏波コンバータの偏光変換部71は、波長板89、91、93の替わりに、複屈折材料を一つ以上、配置して構成されてもよい。この際、偏光子101を透過した後の光のパワーが、検出部73で最大となるように制御部75にて復屈折材料の制御を行なう。なお、偏光子101から再生装置15（図1参照）までは、偏光状態を保持することが可能な偏波保持導波路12a（図1参照）で構成することが好ましい。偏光子101の主軸は、偏波保持導波路12aにおいて偏光が保持される角度に設定される。

この偏光子101を用いた偏波コンバータを用いた場合、制御のゆらぎは出力光強度の変動として現れる。これに対し、偏光子101を用いずに、偏波保持導波路12aにおいて偏光が保持される角度に偏光を入射することは可能である。この場合、制御のゆらぎは、消光比の増加という形で現われる。つまり、偏光子101を用いた偏波コンバータは、消光比の変動のトレランスよりも光パワーの変動のトレランスを大きくとれるような非線形信号処理において有効となる。

図13は、本発明に係る第2実施形態の波長分割多重光再生システム103（以下、再生システム103という）を示している。

再生システム103は、分波装置8と偏波コンバータ13との間を延びる光路12₁、12₂、12₃、…12_nに光増幅器105が介挿され、かつ、偏波コンバータ13と光信号再生装置15との間を延びる偏波保持型導波路12a、12b、12c、…12nに可変分散補償器107が介挿されている以外は、再生システム1（図1参照）と同じ構成を有している。

光増幅器105は、分波装置8と偏波コンバータ13との間に配置され、分波装置8から光路12₁、12₂、12₃、…12_nを伝搬してきた信号光 λ_1 、 λ_2

、 λ_3 、 $\dots \lambda_n$ を受光する。そして、光増幅器105は信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 $\dots \lambda_n$ を所定の強度へと増幅した後、光路12₁、12₂、12₃、 \dots 12_nへと出射させる。

すなわち、光増幅器105はそこに入射した信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 $\dots \lambda_n$ の強度を適宜増幅して出射し、そのことによって、例えば波長分割多重通信システムを伝搬してきた信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 $\dots \lambda_n$ の減衰が大きい場合であっても、その減衰を補償することができる。

ただし、光増幅器105を配置する位置は、分波装置8と偏波コンバータ13との間に限定されることはなく、分波装置8と再生装置15までの間のいずれの位置であってもよい。あるいは、光増幅器105は分波装置8の入射ポート8a側に配置され、波長分割多重光に含まれた状態にて信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 $\dots \lambda_n$ を増幅してもよい。

また、光増幅器105による信号光の増幅率は、偏波コンバータ13に含まれる検出部及び制御部によりフィードバック制御若しくはフィードフォワード制御してもよい。

偏波コンバータ13と再生装置15の間には可変分散補償器107が配置され、偏波コンバータ13から出射した信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 $\dots \lambda_n$ は、偏波保持型導波路12a、12b、12c \dots 12nを伝搬して可変分散補償器107に入射する。可変分散補償器107は、伝送路を伝搬することで蓄積された伝送路の波長分散による信号光の波形歪みを補正した後、偏波保持型導波路12a、12b、12c \dots 12nへと出射させる。

なお、可変分散補償器107を配置する位置は格段限定されることはなく、偏波コンバータ13と再生装置15との間その他、分波装置8と光増幅器105との

間、光増幅器 105 と偏波コンバータ 13 との間、再生装置 15 と合波装置 10 との間であってもよい。

図 14 は、本発明に係る第 3 実施形態の波長多重分割光再生システム 109 (以下、再生システム 109 という) を示している。

再生システム 109 は、偏波モード分散補償装置 110 が、可変分散補償器 107 と再生装置 15 との間を延びる偏波保持型導波路 12a、12b、12c、…12n に介挿されている点が、図 13 に示した再生システム 103 と異なっている。

この偏波モード分散補償装置 110 は、伝送路中に局所的かつランダムに存在する複屈折が、偏波モードに伝搬速度差を与え信号光の時間波形を歪めるといふ、偏波モード分散を補償する装置である。

したがって、再生システム 109 によれば、伝送路中の偏波モード分散による波形歪みが補償されるので、再生システム 109 を出射した後における信号光若しくは波長分割多重光の伝送可能距離を延長することができる。

図 15 は、本発明に係る第 4 実施形態の波長分割多重光再生システム 111 (以下、再生システム 111 という) を示している。

この再生システム 111 は、合波装置が偏波インターリーバ機能を有する偏波インターリーバ 112 であり、また、偏波インターリーバ 112 の出射側に、偏波インターリーバ 112 から出射した波長分割多重光の偏光状態を偏光変換するための偏波コンバータ 114 が設置されている点において、再生システム 103 と異なっている。

偏波インターリーバ 112 は、互いに波長の異なる複数の信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n を合波する際に、波長において隣り合う信号光同士を、互いに偏光状態が直交するように合波する偏波インターリーブ機能を有している。

したがって、偏波インターリーバ 112 により合波された波長分割多重光が同一の光路を伝搬した際には、波長において隣り合う信号光間、言い換えれば、隣り合うチャンネル同士間での相互作用による信号光の劣化が抑制される。

また、偏波コンバータ 114 は、偏波コンバータ 114 と、次の波長分割多重再生システム、もしくは、受信器との間を延びる光伝送路（光ファイバ 6）において、波長分割多重光に対する偏波モード分散の影響が最小となる偏光状態へと、偏波インターリーバ 112 の出射ポート 112 a から出射した波長分割多重光に偏光変換を施す。

したがって、この再生システム 111 によれば、この再生システム 111 に入射した波長分割多重光を再生するのみでなく、波長分割多重光の偏光状態を再生システム 111 から出射した後に、伝搬する光路に適した偏光状態とすることが可能である。例えば、再生システム 111 は、次の波長分割多重再生システム若しくは受信器に入射するまでの間、波長分割多重光の劣化を抑制することができる。

なお、この再生システム 111 においては、光増幅器 105 を、分波装置 8 と偏波コンバータ 13 との間ではなく、偏波コンバータ 13 と再生装置 15 との間を延びる偏波保持導波路 12 a、12 b、12 c、 \dots 12 n に介挿し、偏波コンバータ 13 の検出部にて検出された信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n の強度に基づき光増幅器 105 をフィードフォワード制御している。

この場合、再生装置 15 に入射する信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n の強度を一定

にすることができるので、より一層再生装置 1 5 による信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、
… λ_n の再生の程度を安定化することができる。

図 1 6 は、本発明に係る第 5 実施形態の波長分割多重再生システム 1 1 6（以下、再生システム 1 1 6 という）を示している。

この再生システム 1 1 6 は、互いに接続された複数のサブシステム 1 1 6 a、1 1 6 b、…を含んでいる。

各サブシステム 1 1 6 a、1 1 6 b、…は、光路 1 2₁ の両端近傍、すなわち分波装置 8 側及び合波装置 1 1 2 側に、それぞれ、光スイッチ 1 1 8 a、1 1 8 b、…及び 1 2 0 a、1 2 0 b、…が介挿されている以外は、再生システム 1 1 1 と同じ構成を有する。なお、図 1 6 中、線の錯綜をさけるために各サブシステム 1 1 6 a、1 1 6 b、…における光路 1 2₁ 以外の光路 1 2₂、1 2₃、…1 2_n の記載を省略した。

図 1 6 に示したシステム 1 1 6 においては、光スイッチ 1 1 8 a と 1 1 8 b との間が光路 1 2 2 で接続され、光スイッチ 1 2 0 a と 1 2 0 b との間が光路 1 2 4 で接続されている。

したがって、各サブシステム 1 1 6 a、1 1 6 b、…は、光路 1 2₁ もしくは偏波保持型導波路 1 2 a に少なくとも 1 つの光スイッチが介挿されていることにより、自身の分波装置 8 により分波された信号光ではなく、波長分割多重光通信システムの他の箇所から伝搬してきた信号光に対しても再生処理を施すことができる。

そして、これら各サブシステム 1 1 6 a、1 1 6 b、…を光路 1 2 2、1 2 4 で接続することにより、再生システム 1 1 6 は全体としてルータ機能を備えている。

なお、光スイッチ118a、118b、…、もしくは、光スイッチ120a、120bは、半導体光スイッチであるのが好ましい。再生システム116の大型化を防止できるとともに、サブシステム116a、116b、…間で光路を切換えるスイッチング速度を高めることができるからである。

詳しくは、半導体光スイッチは、半導体材料に、異方性エッチング若しくは犠牲層エッチング等のマイクロマシーニング技術を適用して形成された光スイッチであって、Micro-Electro-Mechanical-System（以下、MEMSという）の一種である。

本発明は、上記した実施形態に限定されることはなく、種々変形が可能である。例えば、図2の再生装置15を半導体基板上に集積回路として形成することで、再生装置15を一体化・小型化することができる。

また、再生装置15においては、波形再生装置、雑音除去装置及びクロック再生装置は、互いに同じ非線形光学効果を利用する場合には同一の機能を有することがあることから、これらのうちいずれか一つ又は二つを省くことが可能であり、もって再生装置15を構成する装置の数を減少させることができる。

以下に、本発明の再生装置（図1参照）についてさらに詳述する。

図17は、再生装置200の一実施例を示す概念図である。この再生装置200は、soliton converter202、pulse roller204、Kerr-shutter206そしてsoliton purifier208が順に配置されて構成される。なお、再生システム1としては、図1のようにこの再生装置200の前段に偏波コンバータ13を配置するのが望ましいが、偏波が保持される状況であればそれを要しない図44のようなシステム形態でも構わない。

はじめに、伝送によって劣化された光信号 210 が soliton converter 202 によって残留チャープ除去とともに波形整形される。その後、pulse roller 204 に入力され、そこでは波形整形された信号光が次段の Kerr-shutter 206 に適した波形である矩形波に変換される。以上のような前処理の後、Kerr-shutter 206 を用いて信号光は波形再生されるだけでなく時間再生され得る。最後に、その再生された信号光をより高品質にする為に、soliton purifier 208 によってソリトン以外の成分、例えば光増幅に伴い発生する自然放出光などを除去する。この再生装置 200 の各コンポーネントの動作は光非線形性に基づいている為に偏波依存性を有していることが多い。よって、図 45 に示すように各コンポーネント 202、204、206、208 の入力側に必要に応じて偏波コントローラ 302 や偏光子 304 を配置するのが好ましい。なお、再生装置 200 内において、偏波状態変化が小さい場合、これらは不要となる。また、図 46 のように再生装置 200 内の各コンポーネント 202、204、206、208 のうち、少なくとも一つのコンポーネントを利用したシステムを構築してもよい。例えば、図 46 に示すように、device A と、our device として配置された soliton converter と、device B とからなるシステムを構築させてもよい。システムの目的に応じて、our device を上述した各コンポーネント 202、204、206、208 から適宜選択し、この各コンポーネント 202、204、206、208 に対応する device A、device B を配置させればよい。

以下では、この再生装置 200 の各コンポーネントについて説明する。

再生装置 200 の初段は、soliton converter 202 である。なお、soliton converter 202 の関連技術は、Dany et al., Opt. Lett., 25, p. 793, 2000 や、Matsumoto et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 14, p. 319, 2002 に記載されている。

図 18 は、soliton converter 202 の一構成例である。soliton converter 202 は、異常分散ファイバ (anomalous-dispersion fiber : ADF) 212 と、光

フィルタ (band-pass filter: BPF) 214とで構成される。入力された信号光は異常分散ファイバ伝搬に伴い異常分散性と非線形性の相互作用により soliton-like なパルス列に変換される。更に、光フィルタ 214 を通過することによって、光リミッタ機能が実現され、雑音除去も可能である。ただし、ADF 212 への入力光パワーがソリトン効果発生に不十分な場合は、図 18 に示すように、ADF 212 の前段に光増幅器 216 とそこで発生する自然放出光を除去する為の光フィルタ 218 を配置させてもよい。

なお、図 18 に示した soliton converter 202 の構成では、ソリトン伝搬におけるソリトン効果を介する入力雑音の増幅が問題となる場合がある (Kubota et al., J. Opt. Soc. Am. B, 16, p.2223, 1999)。これは雑音を有するソリトンがファイバ伝搬においては異常分散と非線形性の相互作用によって生じるパラメトリック利得を介して振幅・位相雑音が増幅される為である。

これを抑圧する為には、soliton converter 202 において、ADF 212 のファイバ長を短くすることが好ましい。ADF 212 のファイバ長が短くなると、雑音とソリトンが伝搬する距離が減少し、そのままそれらの相互作用の抑圧につながる。従って、ADF 212 の短尺化は波形整形に伴う雑音増幅の低減化に有効である。なお、ADF 212 のファイバ長の詳細については後述する。

これに反し、十分な波形整形機能の実現には、非線形効果が必須である。従って、非線形効果発生に必要なファイバ長 (非線形長) 以上のファイバ長が soliton converter 202 に必要となる。また、公知文献 (Deny et al., Opt. Lett., 25, p. 793, 2000) では soliton converter にはソリトン周期 z_0 以上のファイバ長が必要であることが示されている。ただし、 z_0 は以下の式で与えられる。

【数 1】

$$z_0 = \frac{\pi T_0^2}{2 |\beta_2|}$$

T_0 は入力パルスに対する強度がピークの $1/e$ となる点の半値幅である。 β_2 はsoliton converterの分散値である。このsoliton converter 202の性能のファイバ長依存性を実験的に明らかにする為、ソリトン周期で規格化したファイバ長（規格化ファイバ長： z ）が異なる3種類の光ファイバに対するsoliton converterからの出力パルスの光信号雑音比（OSNR）とスペクトル線幅増大の入力パワー P_{in} 依存性を測定した。その結果を図20Aと図20Bに示す。ただし、ソリトン次数 N をその横軸にとった。 N は P_{in} を基本ソリトン励起パワーで規格化した値の平方根であり、以下の式で与えられる。

【数2】

$$N = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}$$

なお、 γ はファイバ非線形係数である。

図20Aおよび図20Bからわかるように、規格化ファイバ長： z によらず、全てのsoliton converterにおいて N の増大に伴いOSNRが劣化する。しかしながら、ADF 212のファイバ長が、ソリトン周期の2周期程度のファイバ長ではその劣化が小さいことが示されている。また、このsoliton converterのみがスペクトル線幅（ $\Delta \nu / \Delta \nu_{in}$ ）が増大しないことも示されている。以上の実験結果から、規格化ファイバ長 z が2以下のsoliton converterが雑音増幅抑圧に有効であることが示された。なお、 $z=2$ 以下の N とOSNR、もしくは N と $\Delta \nu / \Delta \nu_{in}$ の関係は、図20A、図20Bの最上段と同じ結果が得られるため、図示は省略する。

また、soliton converter 202は再生装置200の初段に配置される為、その入力パルスは残留分散によってチャープを有する場合がある。信号光は、チャープを有すると、パルスに変換される際、パルス幅が広がってしまうという問題が

生じる。このため、soliton converter 202は、入力パルスが有するチャープに対する性能も重要となる。

これを検討する為、(ソリトンコンバータの前に) single-mode fiber (SMF) を伝搬させることによってチャープが付加されたパルスをsoliton converter 202に入力し、出力されたパルス波形を測定した。その出力パルスの自己相関波形幅 Δt_{AC} の入力パワー P_{in} 依存性を図21に示す。図21の左部は、出力光フィルタに入力する前のパルス幅を示し、図21の右部は出力光フィルタから出力されたパルス幅である。

図21からわかるように、入力チャープ量を増大させた(SMF長を増加させた)場合、 P_{in} を増大させることにより、入力のチャープ量(SMFの長さ)にかかわらず Δt_{AC} が減少する傾向が示されている。つまり、この実験結果を解釈すると、入力チャープ依存性は P_{in} 調整によって補償することが可能ということである。これを直接的に実験によって確認した結果を図22に示す。

図22の左部は、入力パルス波形を示し、図22の中央部は、 P_{in} 調整を行った場合のsoliton converterからの出力パルス波形を示し、図22の右部は出力フィルタからの出力パルス波形を示している。図22の左部のように、特性が異なるパルス列をsoliton converterに入力しても、 P_{in} を調整することにより、出力パルス波形は、同様なパルス波形が得られることが示されている。具体的な P_{in} の調節方法の一例としては、soliton converterの前に可変減衰器を配置し、光パワーを制御する手法が考えられる。

本実施例の短尺soliton converterにおける出力ソリトンの自己相関幅 Δt_{AC} と、OSNRの P_{in} 依存性を図23に示す。上述したように、長尺型に比べてOSNR劣化がある程度抑圧されている。その一方で、 Δt_{AC} が極小となる P_{in} においてはOSNRが著しく劣化してしまう。

言い換えると、パルス圧縮と雑音増大にはトレードオフ関係がある。雑音抑圧とパルス圧縮を両立する手法が本発明の一つである圧縮器と波形整形器の組合せである（図19）。波形整形器の前にパルス圧縮器が配置される構成である。ここでは、波形整形器は前述のsoliton converterだけでなくMamyshev フィルタやNOLMなども含まれる。一般に、入力パルスピークパワーが高いほどファイバ非線形効果を基本とする波形整形器の性能は向上され得る。これを活用するのが本発明である。事前にパルス列を圧縮しピークパワーを増大させ波形整形器に入力する方式である。

特に、これには低雑音性に優れる断熱圧縮方式を基本とする圧縮器が適している。この方式の実現には、ファイバ長手方向に分散値が減少するファイバ（分散減少ファイバ）や緩やかな利得を有するファイバ（例えばラマン増幅ファイバ）を用いる手法がある。また、前者ファイバを数種類のファイバの連結によって模倣するステップ状分散プロファイルを持つファイバ（SDPF）や櫛状分散プロファイルを有するファイバ（CDPF）も提案されている。特に、2種類のファイバの組合せで構成されるCDPFは、作製が容易であるため好ましい。

なお、光パルスの断熱圧縮は、光ソリトンが分散効果と非線形効果がつりあっている定常パルスであり、どちらかの効果を増減させると、もう一方の効果がそれに追随するように、光パルスのパラメータが自動的に変化することを利用している。ここで、分散効果はファイバの分散値およびパルス幅の逆数の2乗、そして非線形効果はファイバの非線形定数およびパルス電力に、それぞれ比例する。つまり、非線形効果が一定の状況で、ファイバの分散値を減少させると、それを補填するべくパルス幅の逆数の2乗が大きくならなければならない、結果的にパルス幅が小さくなる。

以上の原理にもとづくと、パルスの断熱圧縮を実現させるためには、上述したよ

うな、ファイバの分散値を長手方向に減少させる方法の他に、分布ラマン増幅器を用いる方法と、ファイバの非線形性を長手方向に増大させる方法が考えられる。前者の方法は、光パルスの電力が分布ラマン増幅によって伝搬中に大きくなるため、非線形効果が増加し、分散値と非線形定数が一定のファイバにおいては、分散効果がそれに追従するように、パルスの幅が小さくなる。

一方、後者の方法は、分散値が一定で、非線形効果が長手方向に増加する（ファイバ損失によってパルス電力が減衰したとしても、ファイバ非線形定数が十分増加していて、電力と非線形定数の積が長手方向に増加すれば、結果的に非線形効果は増加する）ようなファイバにおいては、増大する非線形効果に追従するために、分散効果も大きくならねばならず、やはりパルスの幅が小さくなる。

ファイバの非線形定数を増加させる方法は、長手方向に連続的に増加させる方法の他に、ステップ状に変化させる方法や、楕形に非線形定数配置して近似する方法によっても実現できる。

以上、ファイバ型波形整形器について記述してきたが、波形整形機能を実現するのはファイバのみとは限らない。一般に、入出力特性において閾値と飽和特性を有する（これを可飽和吸収特性とよぶ）デバイスは、波形整形機能を有する。以下では、この可飽和吸収体に関して示す。

全光再生中継（O3R）やモード同期レーザにおいて、可飽和吸収特性を有するデバイスは不可欠である。従来、可飽和吸収体には、光ファイバの非線形性を用いたものもあるが、材料の可飽和吸収特性を直接応用したものとしては、半導体可飽和吸収鏡（SESAM；semiconductor saturable absorber mirror）（S. Tsuda, W. H. Knox, E. A. de Souza, W. Y. Jan, and J. E. Cunningham, “Low-loss intracavity AlAsAlGaAs saturable Bragg reflector for femtosecond mode locking in solid-state lasers,” Opt. Lett., Vol. 20, No. 12, pp. 1406-1408,

June 15, 1995.) やカーボンナノチューブ (CNT ; Carbon Nanotube) (S. Y. Set , H. Yaguchi, Y. Tanaka, M. Jablonski, Y. Sakakibara, A. Rozhin, M. Tokumoto, H. Kataura, Y. Achiba, K. Kikuchi, "Mode-locked fiber lasers based on a saturable absorber incorporating carbon nanotubes," Postdeadline papers, OFC2003, PD 44., 2003) を用いたものが提案されている。しかしながら、上述した SESAM の可飽和吸収体を利用する場合、所望の特性を得るためには、材料の可飽和吸収特性を最適化する必要があり、材料作製時における条件の安定性や再現性が難しいという問題がある。

可飽和吸収特性は、SESAM を利用する場合、可飽和吸収層周辺の組成、吸収スペクトル、厚み、ブラッグ・ミラーと可飽和吸収層との相対位置関係などで決まる。特に、ブラッグ・ミラーで反射する光が入射光とともに定在波を形成するため、トータルの光強度密度は、半導体深さ方向に対して分布を持つ。可飽和吸収層とこの光強度密度分布との相対関係は、同じ入射光強度に対しても異なる可飽和吸収特性を与える要因となる。CNT の場合は、バンドギャップや厚みが主な設計パラメータとなる。いずれの場合でも、所望の可飽和吸収特性を正確に実現することが難しく、QSR やモード同期レーザなど、システムの構築において歩留まりや特性の制限がある。

また、モード同期レーザでは、発振パルス特性が可飽和吸収特性によって左右されるため、得られるパルス特性は、可飽和吸収体の選定により決定される。これは、モード同期レーザの歩留まりが悪くなるだけでなく、発振されるパルス特性の制限にもつながる。また、パルス発振するために必要な可飽和吸収特性と、より短パルス動作ならびに高エネルギー動作を実現するための可飽和吸収特性とは、原理的に異なるという問題もあり、パルスを発振するために、定常動作でのパルス特性を犠牲にせざるを得ないという問題が生じていた。

これらの問題を解決するため、本発明の一実施例として、上述した可飽和吸収体

は、可飽和吸収特性を可変構造とした。可飽和吸収特性が可変であれば、製造時に特性を調整し所望の特性を実現するよう工程を組むことができ、歩留まりを向上できる。また、システムとして敷設後でも可飽和吸収特性を調整することができれば、動作条件が外乱やシステム設定の変更等によって変更となっても柔軟に対応することができる。

また、モード同期レーザにおいて可飽和吸収特性が可変であれば、パルスを発振するときの可飽和吸収特性からパルス動作を保持したまま、さらに所望のパルス特性が得られるよう可飽和吸収特性を可変することも可能となり、従来難しかったパルス発振と短パルス・高エネルギー動作の両立が可能となる。

以下、上述した内容を図で説明する。図47に、典型的な可飽和吸収特性を示す。横軸は入力光強度であり、縦軸は出力光強度である。線形の場合と異なり、低入力光強度領域では閾値特性を有し、光入力光強度領域では、飽和特性を示すのが特徴である。可飽和吸収特性を可変にするということは、この曲線を自由に調整できることを意味する。さらに、詳述すると、この閾値飽和特性が一定の光強度に対して変えることができるようにするということである。つまり、図47の曲線を図にあるように伸び縮みさせたり、傾きを変化させたりするというのである。

一般に、可飽和吸収体へ入射する光強度密度を可変にすれば、可飽和吸収特性を可変にすることが可能である。図48にその系を示す。光ファイバ306から出射した光を集光し、再びもう一方の光ファイバ308に結合するまでの過程で、どの位置に可飽和吸収体310を配置させるかによって、可飽和吸収体310に入射する光強度密度が異なる。図48は、透過型であるが、図49は、反射型の構造を示している。反射型の場合は、ビームウエイストが変化するように光学系を動かすことで同様の効果が得られる。

また、SESAMやCNTの可飽和吸収特性に面内分布を持たせることもできる。例えば、SESAMでは、ブラッグ・ミラーと可飽和吸収層との位置関係を膜厚の面内分布を利用して面内で連続的に変化するように成形することができる。あるいは、ブラッグ・ミラーと可飽和吸収層の位置関係の変わりに、可飽和吸収層の組成や膜厚を面内で変化させることによって可飽和吸収特性に面内分布をもたせることもできる。CNTでも、膜厚に面内分布をもたせたり、製造時基板に温度勾配を持たせるなどして面内でバンドギャップをはじめ、CNTの構造を変化させたりすることで、可飽和吸収特性に面内分布をもたせることもできる。

このように、可飽和吸収特性に面内分布を有する可飽和吸収体 310 を、図 50 のように空間結合系で結合する光ファイバ 306、308 間の光路に移動可能に配置させることで、可飽和吸収特性が可変のデバイスが実現できる。移動可能な方向は、縦、横、斜め、また光路に対し傾斜させる方向にしてもよい。いずれも、可飽和吸収体 310 を通過する光路長を可変にするためである。なお、この可飽和吸収体の移動方向は、図 48 の透過型、図 49 の反射型においても同様の構造にすればよい。

本発明をモード同期レーザに応用する際、パルスを発振する可飽和吸収特性から、図 47 にある曲線を徐々に上方向へ伸ばすように調整することで、徐々に、パルス幅とエネルギーをそれぞれ、狭く大きくすることができる。これは、図 48 を例にすると、可飽和吸収体 310 を徐々に中心 312 からレンズ 316 側に向かって移動することに対応する。なお、図 48 では、中心 312 よりレンズ 316 側に可飽和吸収体 310 を移動させたが、中心 312 よりレンズ 314 側に可飽和吸収体 310 を移動させても、同様の効果が得られる。

このように可飽和吸収体 310 を移動させると、可飽和吸収体 310 への入射光強度密度が小さくなるため、図 47 では曲線が縦・横軸方向に伸びることに対応する。このことは、図 50 のような構成の場合、可飽和吸収特性の弱い方へ可飽

和吸収体 310 を移動させると、同様の効果が得られる。弱い可飽和吸収特性とは、たとえば、CNT を例にすると、CNT の膜厚が薄いことに対応する。このような可変性は、製造時に可飽和吸収特性を調整するために用いても良いし、システム使用時に可変制御可能なデバイスとして応用しても良い。

次に、時間再生装置である Kerr-shutter 206 の実施例を図 24 に示す。本実施例は OPLL (optical phase-locked loop) 220 と光スイッチ部 222 とからなる。OPLL 220 は、光位相比較器 224 と、光 LO 発生器 226 と、制御部 228 とから構成される。

OPLL 220 では、位相比較器 224 によって外部から入力される信号光と光 LO 信号光 (以下、光 LO と呼ぶ) の位相差を検出し、制御部 228 ではその位相差に基づき光 LO の繰返し周波数を調整する。その結果として、外部信号光と同期した光クロックパルス列が得られる。このクロックパルス列と外部信号光を光領域でスイッチングすることによって、時間再生された信号光が得られる。以下では、本発明各部の詳細を示す。

上述したように、本実施例の OPLL 220 は、光位相比較器 224 と、光 LO 発生器 226 と、制御部 228 とから構成される。光位相比較器 224 は、光ファイバから構成される FWM 部 230 と、光フィルタ 232 と、受光部 234 を基本構成としたものである。FWM 部 230 は、非線形性光ファイバもしくは、図示されていないが PPLN (Periodically-poled LiN03)、SOA (semiconductive optical amplifier) 等の FWM が行われる光学素子から構成される。

OPLL 220 では、外部からの信号光と光 LO を FWM 部 230 に入力することにより、新規に FWM 光が発生する。この FWM 光は、光フィルタ 232 により抽出されフォトダイオード (photo-diode: PD) からなる受光部 234 に受光される。

受光部 234 及び制御部 228 では、この出力電気信号を位相差信号として認識し、この認識に基づき光 LO の発振周波数（繰返し周波数に対応）を調整する。この結果、外部信号光に同期したクロックパルス列が得られる。なお、FWM 部 230 において非線形性を十分に起こす（FWM を効率良く発生させる）為には、必要に応じて（図 24 に示すように）、EDFA や半導体光増幅器などの光増幅器 236 及び光フィルタ（図示せず）を FWM 部 230 の前段に配置させてもよい。なお、位相差信号を取得するためには、FWM 部に PPLN、SOA 等の FWM が行われる光学素子を使用することが可能である。この場合、OPLL ループ長がさらに短尺化され、OPLL の帯域がより大きくなる。

さらに、外部信号光と光 LO の位相関係を認識するために FWM 部を PPLN や非線形光学結晶に変え、第二次高調波発生光（SHG ; Second-Harmonic Generation）の強度変化を利用しても良い。また、入力信号光の波長には感度を持たずより短波長の光に感度を持つ PD に入射し、PD 内の二光子吸収により位相関係を光電流量に変換して検出しても良い。

一方、光 LO 発生器 226 はビート光発生器 238 から構成される。具体的には、2 つ以上の周波数成分を持つ一台以上の半導体レーザが好ましく、図 24 では、その一例である 2 台の半導体レーザ（laser diode: LD）から構成されるものを示した。ビート光発生器 238 から出力された CW 光は、光カップラ 240 により合波することによってビート光が得られることになる。なお、ビート光の周波数は、ビート光発生器 238 の少なくとも一方の駆動電流及び温度を調整することによって制御される。

このビート光を光 LO として光位相比較器 224 へ入力させるとともに、クロック信号として光スイッチ部 222 にも入力される。また必要であれば、光スイッチ部 222 に入力する前に、光ファイバ圧縮器 239 によってビート光からソリ

トン列へ変換し事前に光スイッチ部 2 2 2 に適した波形にクロック信号波形を整形してもよい。

クロック抽出において最も重要なのは、出力されるクロックパルス列のタイミングジッタ低減化である。言い換えると、パルスの時間的位置の正確さである。本実施例においては、タイミングジッタを低減化する為に、以下の 3 つの手法がなされている。

一つ目は、O P L L 2 2 0 のループ短尺化である。タイミングジッタは O P L L 2 2 0 のループ長に相関があり、ジッタ抑圧にループ短尺化（ファイバ短尺化）が有効である。特に、本実施例では、位相比較器 2 2 4 が F W M を基本とした構成となっているため、従来の N O L M 型に比べ、よりループの短尺化を実現することができる。この結果、本実施例では、ジッタが抑圧されたクロックパルス列を得ることが可能となる。位相比較器 2 2 4 の F W M 部 2 3 0 の光ファイバとしては、通常の伝送路用ファイバに比べて 5 倍以上の非線形係数を有する高非線形ファイバ（highly-nonlinear fiber: HNLF）を採用することでも、ループ長（ファイバ長）の減少化が実現される。

二つ目は、図 6 8 におけるファイバ長 L_{A-B} [m] とファイバ長 L_{A-C} [m] の長さをほぼ同じ長さにするることである。ファイバ長 L_{A-B} とは、分波器 A と光スイッチ B をダイレクトに接続したファイバの長さであり、ファイバ長 L_{A-C} とは、分波器 A からクロック抽出部、ファイバ圧縮器を介して光スイッチ C に接続されたファイバの長さである。分波器 A で分岐した信号が光スイッチ B に到達するまでの時間 τ_{A-B} 、もしくはクロック抽出部、圧縮器を介して光スイッチ C に到達するまでの時間 τ_{A-C} は、次のように記述される。 τ_{A-B} は $(=L_{A-B}/v)$ [s]、 τ_{A-C} は $(=L_{A-C}/v)$ [s] である。ここで、 v [m/s] はファイバ中の光の速度である。図 6 8 のファイバ圧縮器は、例えば数 km の長さを必要とする。そのため分波器 A と光スイッチ B との間にファイバ長 L_{A-C} [m] と同程度の長さのファイバを付加しなければ、光スイッチに到

達する信号の時間差 $|\tau_{A-B} - \tau_{A-C}|$ は、数 μs となる。光スイッチにおける信号光と光LOのビットレート差の上限は時間差に対して、 $\Delta\omega < |\delta B + \delta L| \times |\tau_{A-B} - \tau_{A-C}|$ で示される。ここで δB [Hz] は信号のビットレートの線幅、 δL [Hz] は、LO出力光の周波数線幅、と記述される。よって、時間差 $|\tau_{A-B} - \tau_{A-C}|$ を小さくすることにより（言い換えると、ファイバ長差 $|L_{A-B} - L_{A-C}|$ を小さくすることにより）、ビットレート差 $\Delta\omega$ が小さくなり光スイッチを行うタイミングジッタを低減化できる。

三つ目は、LDペア駆動回路である。光LO発生器226では、2台のLDを直列駆動することにより、駆動電流源に由来するLD波長揺らぎをキャンセルすることが可能となる。実際に、このLD直列駆動による雑音抑圧効果を測定した結果を図25に示す。図25Aは、LDペアの独立駆動時のタイミングジッタ特性を示し、図25Bは、LDペアの直列駆動時のタイミングジッタ特性を示すものである。独立駆動時に比べて直列駆動時のジッタが1/10に低減されていることが示されている。LDの直列駆動による雑音低減の理由は、二つのLDの駆動電流変化が等しい為である。このLDペア駆動回路の代わりに、カレントミラー回路を用いても同じ状況が実現される。

図24のように、一般にOPLL部220と光スイッチ部222が分離していて、光LO発生器226内の光パルス圧縮器239は、長さL(m)を持つ。入力した信号光が最初の分波器241（図24の入力した信号光がOPLLと光スイッチ部に分波される分波器）で分配された後、位相調整部246を通過して光スイッチ部222に到達する時間を τ_1 とし、OPLL部220で同期を取った後、光スイッチ部222に同期信号が到達する時間を τ_2 とすると、 τ_1 と τ_2 は異なり、時間遅延 $T_{lag} = |\tau_2 - \tau_1| = n \cdot L / c$ で表される。なお、 n はファイバの屈折率、 c は光速である。入力信号光の周波数 ω_1 ($t - \tau_1$) とクロック抽出後に光LO発生器226から出力されたビート光の周波数 ω_2 ($t - \tau_2$) は、一般的に異なる。光スイッチ部222における入力信号光と、光LO発生器22

6で発生された同期信号との位相差 $\Delta\phi$ は、 $\Delta\phi = 2\pi(\omega_2(t - \tau_2) - \omega_1(t - \tau_1)) \cdot T_{lag} = \Delta\omega \cdot T_{lag}$ と記述される。位相誤差 $\Delta\phi$ の許容値が0.05 (rad)である時、 $\Delta\omega < 0.05(n \cdot c) / (2\pi L)$ (Hz)となる。一例としては、 $L=1000$ (m)、 $n=1.5$ の場合、周波数誤差 $\Delta\omega < \text{約} 500$ Hzであれば、位相誤差が許容される。このように光パルス圧縮器239の長さ L に依存して光LO発生器226の出力ビート光の周波数線幅の許容量が決定される。

次に、図24と図68を用いて、ループ長の最適化について説明する。なお、ここでいうループ長とは、図68に示した光クロック抽出器(optical clock extraction)内の光ファイバ長のことを示す。上述のように、ビットレート差を $\Delta\omega$ 、ループ長を L_{Loop} 、 v を光ファイバ中の光の速度、 L_{A-B} を分波器Aと光スイッチBとを接続したファイバの長さ、 n を光ファイバの屈折率、 X を任意の数とすると、 L_{Loop} は、 $\Delta\omega(L_{Loop}) < v \cdot X / n \cdot L_{A-B}$ の関係が成り立つように決定されることが好ましい。つまり、本発明では、FWM部230として高非線形ファイバを用いたため、 L_{Loop} が短くなる。この結果、 $\Delta\omega$ も小さくなるため、タイミングジッタの低減化につながる。

光スイッチ部222は、FWM部242と、光フィルタ244と位相調整部246から構成される(図24を参照)。位相調整部246以外は、位相比較器224と同様の構成である。

光スイッチ部222では、まず、信号光とクロックパルス列をFWM部242に inputsする。FWM部242からの出力では時間再生された信号光がFWM光として発生する。その光波は光フィルタ244によって入力光成分と分離され出力される

ただし、クロックパルスと信号光はOPLL220によって同期している(周波数は一致している)ものの、その位相を合わせる必要がある。その為に、信号光

もしくはクロックパルスの少なくとも一方の光パスに挿入された可変光遅延線（DL ; delay line）からなる位相調整部 2 4 6 によって位相が調整される。

なお、位相調整部 2 4 6 は遅延長が半固定であっても可変であっても良い。位相調整部 2 4 6 が半固定である場合は環境の温度変化に対して必要とされる調整量が変わらないように、系全体の温度を一定に制御する必要がある。また、位相調整部 2 4 6 が可変である場合、位相調整量は、出力パルスの一部を受光して得られる電気信号に基づき決定される。

ここでは、ファイバ型の FWM 部 2 4 2 について説明する。このファイバ型 FWM 部では、パルスの光ファイバ伝搬に伴う分散及び非線形効果による波形歪が生じる場合がある。これを抑圧する為には、入力パルス条件に適した波長（周波数）配置とファイバ選択が重要となる。この抑圧方法について以下の（１）～（４）の順に説明する。ここでは、入力ポンプパルスの時間幅を Δt_p 、スペクトル幅を $\Delta \nu_p$ 、ピークパワーを P_p とし、入力信号パルスの時間幅を Δt_s 、スペクトル幅を $\Delta \nu_s$ 、ピークパワーを P_s と表し（図 5 1 参照）、周波数配置と使用するファイバの設計を考える。

（１）FWM においては、３光波のスペクトル成分が重ならないようにポンプ光と信号光の周波数間隔 $\Delta \nu$ （離調量）を十分に確保する必要がある。この条件を以下の式で与える。

【数 3】

$$\Delta \nu > \frac{|\Delta \nu_p + \Delta \nu_s|}{2}$$

【0 0 0 0】

（２）上式で与えられる $\Delta \nu$ に対する波長変換においては、少なくとも $2 \Delta \nu$ 以上の帯域が必要となる。一方で、FWM におけるファイバの帯域制限の要因には、（a）波長分散による位相不整合、（b）偏波分散、（c）コヒーレンス劣化

、が考えられる。要因 (a) に対しては、位相整合条件を満足する周波数配置にする、即ち、ポンプ波長とファイバのゼロ分散波長を一致させることによって回避可能である。また、一般に (c) の要因は、(b) の要因よりも影響が少ない。従って、通常の FWM では (b) 偏波分散による帯域制限が支配的となる。この帯域制限に対してはファイバの偏波保持化 (S. Watanabe et al., ECOC97, PD 7, 1998.) が有効であるが、作製の困難さが問題である。その他の広帯域化手法としてはファイバ短尺化が有効である (O. Aso et al., EL, vol. 36, p. 709, 2000.)。それを示したのが図 5 2 である。この図 5 2 に示されたファイバ長と帯域の関係に基づき離調 $\Delta \nu$ に必要な帯域を確保できるファイバ長 ΔL を準備する。

。

(3) FWM 発生に十分な非線形効果を得るためには、入力ポンプパルスに対する非線形長 L_{NL} 程度のファイバ長 L が必要である。これを以下の式で定量化する。

【数 4】

$$1 < \frac{L}{L_{NL}} = \gamma P_0 L$$

ただし、上述したように FWM 帯域を確保する為に L には上限がある。従って、上式条件を満足させる為には γP_0 の増大化が重要となる。その一方で、高パワーパルスのファイバ伝搬では、非線形効果により自己位相変調 (SPM) から生じるスペクトル波形歪が問題となる。これを抑圧する観点から、SPM によってポンプパルススペクトルが双峰化する非線形位相シフトである $3\pi/2$ (アグラワル著、「非線形ファイバ光学」、吉岡書店) 以下に $\gamma P_p L$ に上限を設定する。

【数 5】

$$\gamma P_p L \leq \frac{3\pi}{2}$$

以上の二つの式からスペクトル歪無く FWM を行う γP_p の範囲が明らかになった。

。

(4) FWM伝搬では、入力ポンプパルスと信号光パルスに対する分散効果によって、それら時間波形に歪みが生じる場合がある。これらを抑圧する為には、それらパルスに対する2次・3次分散効果を低減化する必要がある。この条件は以下の式で与えられる。

【数6】

$$\frac{L}{L_{SOD}} < \frac{1}{2}, \frac{L}{L_{TOD}} < \frac{1}{2}$$

ここで、位相整合条件を満足する波長（周波数）配置では、入力ポンプ波長での2次分散値は小さい。その為、ポンプパルスに対しては3次分散効果が支配的となり、これを抑圧する条件は以下の式で与えられる。

【数7】

$$\beta_3 < \frac{1.7628^3}{2} \frac{\Delta t_p^3}{L}$$

また、入力信号光パルス波長での2次分散値は $2\pi\beta_2\Delta\nu$ によって与えられ、この抑圧条件は以下の式で与えられる。

【数8】

$$\beta_3 < \frac{1.7628^2}{4\pi} \frac{\Delta t_s^2}{L\Delta\nu}$$

以上の(1)から(4)に記した数式により、時間波形歪の無いFWMに必要なファイバが設計される。その設計手順を図53のフロー図にまとめる。

次に、実際のFWMの実施例として、図53の手順に基づき設計されたファイバを用いたFWM器を用いて160GHzピコ秒パルス列の波長変換を実験した結果を示す。その実験系を図54に示す。図54の構成は、1556nmの160GHz、2psのパルス列と、1540nmのCW光を3dBカプラによって合波し、0.2km長の低スロープHNL

Fに入力するものである。発生されたFWM成分は、2段構成のBPF（透過中心波長は1572nm、半値幅4.5nm）によって抽出される。なお、ここで用いたHNLFの γ と分散スロープはそれぞれ24.1/W/kmと0.014ps/nm²/kmである。これらは図53に示された手順で決定されている。入力パルスとCWのパワーがそれぞれ19dBmと13dBmの時のHNLF入出力スペクトル波形を図55に示す。出力において1572nm付近と、1524nm付近にFWM成分が発生しているのが示されている。このFWMパルスの自己相関波形を図56に示す。比較の為に入力パルスの自己相関波形も示した。FWM成分抽出に用いた2段構成のBPFによってパルス幅が10%程度増大しているものの、パルス時間波形歪み無く波長変換されていることが示されている。2段構成のBPF通過後のFWMパワーは-2dBmであった。

なお、図54では、BPFを2段構成としたが、入力パルスとCWの成分が十分に除去出来れば一段構成でも良く、さらには3段構成、4段構成・・・n段構成としても良い。また、図54および図55では、透過中心波長が1572nmであるBPFを用い、FWMにより長波長側に発生した1572nm付近のみを出力パルスとして取り出したが、図示しないが、透過中心波長が1524nmのBPFを使用すれば、短波長側に発生したFWM成分を取り出せることは言うまでも無い。

この実施例では、入力パルスとして、隣接パルス間の位相が逆相関係になっているキャリア抑圧されたパルス、いわゆるCS-RZパルス（Carrier Suppressed Return-to-Zero）が用いられている点に注目する。まず、FWMによって発生するパルス列の隣接パルス間の位相関係を考える。入力CW光がFWMポンプとして機能した際、短波長側に発生するFWM変換光（本実施例では1524nm付近の成分）は、隣接パルス間が逆位相となるCS-RZパルス列である。一方で、入力パルス列がFWMポンプとして機能した際、長波長側に発生するFWM変換光（本実施例では1572nm付近の成分）は、隣接パルス間が同位相関係のRZパルス列である。この特性を用いることにより、CS-RZパルス列をRZパルス列に変換することが可能となった。また、隣接パルス間の位相関係を保持

したい場合は、入力パルスをFWMのポンプとして使用しなければよい。

以上は、FWMを用いた光スイッチ及び波長変換器について示したが、FWM現象を用いる他の形態としては、波形整形機能を実現するデバイスも実現可能である。この構成を図57に示し、現象については図58に示す。構成要素自体は、図54の実施例構成とほぼ同様である。異なるのは入力ポンプパワーを増大化させ、SPMによるスペクトル広帯域化を積極的に活用する点である。これに伴い、発生するFWMパルスのスペクトルも広帯域化される。加えて、入力信号光の入力パルスパワーを増大化させることにより、この非線形効果における相互位相変調効果の結果として、FWMパルススペクトルは更に拡大する。

即ち、ポンプパワーが低い場合、FWMパルスのスペクトル幅は、ポンプパルスあるいは信号光パルスのそれと同程度であるが、ポンプパワーが高い場合では、FWMパルススペクトルが広帯域化される。従って、適切なFWHMを有するBPFを配置することによって、広帯域化されたスペクトルがカットされる為、非線形ロスを実現できる。従って、入力ポンプパワーと出力FWMパワーの関係は図59のようになり、閾値及び飽和特性が実現される。この結果、このFWMデバイスは波形整形機能を有する光スイッチを実現でき、これを用いればO3Rが実現される。

次に図26Aから図26Cを参照し、光受光部234（図24参照）における位相誤差信号を認識する電子回路の構成を説明する。図26Aは、光受光部234の一構成例である。光受光部234は、Photo diode（PD）と、loop filterと、LDコントロール部とからなる。なお、LDコントロール部は、LDの駆動電流や、温度を制御する機構である。

図26Aの光受光部234では、位相比較部224での出力光をPDで受光した後、その低周波信号成分をloop filterで挿出する。この出力電気信号に基づ

き、LD駆動電流を制御することによって、ビート光発生部のLD出力波長、すなわちビート周波数をコントロールする。

図26Bは、図26Aの変形例であり、2台のPDと、加算器と、loop filterと、LDコントローラとから構成される。図26Bでは、位相比較部での出力光だけでなく、信号光パルスの光パワーを2台のPDで受光し、それらの出力差をloop filterに入力する。これによって、信号光パルスと光LOの位相ズレに基づく位相差信号の変化の消光比が向上される。図26Bの光受光部の構成では、より高感度となる。

図26Cは、図26Aの更なる変形例であり、PDと、乗算器と、loop filterと、加算器と、LDコントローラと、参照信号発生器とから構成される。光スイッチ出力をPDで受光した後に、参照信号と乗算した電気信号の低周波成分をloop filterによって挿出する。さらに、それと参照信号の差に基づきLDをコントロールする。図26Cの光受光部の構成では、より効率的に位相比較部での出力光パワー最大値のポイントを見出すことができる。

図60Aは、位相比較部224の変形例であり、FWM部に光ファイバを用いずに位相差を検出するための構成例である。FWM光発生素子500としては、SOAやPPLNなどが利用できる。また、FWM光発生素子500の代わりに、SHG発生素子として、PPLNや非線形光学結晶なども利用することが可能である。また、図60Bに示されるようにPDをSiPD(シリコンフォトダイオード)に置き換え二光子吸収により位相差を検出することも可能である。

また、上述の光時間再生システムの位相比較部224と光スイッチ部222のFWMファイバを融合化させることも可能である。その構成を図27に示す。光位相比較器と光スイッチ部が共通のFWM部250と光LO発生部252から成る。各部要素は前述の図24と同様である。入力信号光と光LOをFWM部250

に入力し、そこで発生するFWM光を光フィルタ254で抽出する。そのFWM光を位相誤差信号として光LO周波数コントロール部に入力すると共に、クロックパルス列として出力する。

以上、光再生システムに必要最低限のコンポーネントに関して記述した。更に、本発明の再生装置200（図17参照）では、その性能を向上させる為にpulse rollerとsoliton purifierを用いる。以下ではそれらの実施形態例を紹介する。

pulse roller204の一実施例を図28に示す。信号光パルスをもとにpulse rollerファイバ260に入力する構成である。そのpulse rollerファイバ260における正常分散性と非線形効果の相互作用によって入力された信号光は矩形化される。非線形効果がパルススペクトルを広帯域化させ、加えて正常分散効果によってパルス時間波形が矩形化される。

ここで、パルス矩形化について、図41A～D及び図42を参照して説明する。図41Aのパルスが正常分散ファイバを伝搬する際、矩形パルスへ変形するが、この際、正常分散の効果と非線形効果(Kerr効果)の相互作用が不可欠である。つまり非線形効果によって、図42の下部のようなアップチャープが生じ、正常分散の効果で低い周波数成分が速く、高い周波数成分が遅く伝搬する。この結果、図41Bのような形に変形する。

詳しく述べると、図42に示すように、パルス強度の変曲点に相当する T_1 と T_2 の間では、線形アップチャープによって、正常分散の効果でパルスが線形的に広がる。なお、 T_0 はパルスの中心位置である。一方、 $T_x < T_1$ および $T_x > T_2$ では（ T_x とは任意の時間）、ダウンチャープとなっているため、パルス先端部では先端ほど（ $|T|$ が大きいほど）ゆっくり、後端部では後端ほど（ $|T|$ が大きいほど）速く伝搬する。つまり時間 T_1 および T_2 の部分にエネルギーが集まり、パルス強度は時間に対して急峻に変化するようになる。その急峻さは、 T_1 および T_2 における瞬時周波数の最大値に比例する。

本発明では高効率な矩形化現象を起こす為に、pulse rollerファイバ260として正常分散増大ファイバ (normal-dispersion-increasing fiber:NDIF) を用いている。このNDIFの分散プロファイルを図29Aに示す。図29Aから図29Cの縦軸は、すべて負の分散値[ps/nm/km]を表しており、座標が上に行くほど分散値は0に近くなる。

図29Aに示すように、NDIFの入力側では低分散値を有する為に、相対的に非線形効果が支配的となる。一方、NDIFの出力側は、高分散値を有する為に、正常分散効果が支配的となる。従って、NDIFの入力側において、パルスは十分にスペクトル広帯域化される。そして、NDIFの出力側において、パルスは強正常分散効果によってそのパルス時間波形が効率良く矩形化される。

この結果、pulse rollerファイバ260 (光ファイバ:NDIF) の短尺化が可能となる。これは、非線形長 L_{NL} と分散長 L_D を用いて定量的に示すと、入力端では $L_D \gg L_{NL}$ であり、出力端では $L_D \ll L_{NL}$ と設計されている。ただし、分散長 L_D は、 $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$ で表される。 T_0 と β_2 は入力パルス時間幅と分散値を表す。また、 $L_{NL} = 1 / \gamma P_0$ である。 γ と P_0 は非線形係数と入力ピークパワーである。

さらに、NDIFを採用することにより、図41Cのように、頭頂部が完全に平坦な矩形パルスを作り出すことができる。これは、 $L_D \gg L_{NL}$ である領域において、パルスはアップチャープされたスーパーガウシアン型パルスへと変形され、次いで $L_D \ll L_{NL}$ なる領域において、正常分散効果によってパルスを線形的に広げることができるためである。アップチャープされたスーパーガウシアン型パルスは、正常分散が作用する線形伝送路を伝搬する場合、頭頂部が完全に平坦となる事実は、理論計算により確認できる。以下では、NDIFの詳細な原理について説明する。

従来のように、pulse rollerに分散値が一定のファイバを使用する場合、非線形

効果を発生させるために大きな入力パワーと、分散効果を発生させるためにある程度大きな分散値の両方が必要だった。この理由は、分散値が低い場合、非線形効果によってアップチャープは生じて、分散の効果がいまいち小さいために、波形が矩形に変化しないためである。一方、分散値が大きい場合、非線形効果によって生じたアップチャープを持つ成分が、分散の効果ですぐに拡散してしまい、さらにピークパワーが小さくなることからチャープが蓄積されないままパルスが伝搬することになる。

この結果、図4-1Bのようにパルスの立ち上がりは鈍く、頭頂部はもとの図4-1Aに示したパルスの立ち上がりとは本質的に変わらず、上に凸なものとなる。パルスの立ち上がりの急峻さは、スペクトルに含まれる高周波成分に依存するため、立ち上がりが鈍いという事実は、十分な非線形効果による高周波成分の発生がなされていないことにも対応する。

上述内容から効率的にパルスを矩形化するためには、まず分散の影響があまりない状態において、非線形効果によるアップチャープを十分に蓄積した上で、その後大きな分散効果によってパルスを変形させればよい。そのような状況は、長さ方向に対して正常分散値を増大させるような光ファイバを用いれば実現できる。

より詳細に述べると、まず光ファイバの入射端では、パルスの入射電力に対応する非線形距離が、入射パルスの幅と分散値に対応する分散距離よりも、十分短いように設計する。この結果、分散の効果よりも非線形効果が支配的になり、伝搬初期に十分に大きなアップチャープが蓄積される。

さらに光ファイバの出射端では、分散距離が非線形距離よりも短く、分散効果が支配的となるように設計する。すでに非線形効果によって高周波成分が発生しているため、パルスの立ち上がりは急峻なものとなる。一方、そのときのパルスは大きなアップチャープを持つスーパーガウシアン型関数で近似できる。そのよう

なパルスは、正常分散の効果が支配的なファイバを伝搬する際、図 4 1 C のようにパルス中心部が上に凸から下に凸の関数になることが、簡単な計算によって確認できる。図 4 1 B から図 4 1 C の状態に変形する途中でパルスを出力させることにより、図 4 1 D のように頭頂部がほぼ平らな矩形パルスを作り出すことができる。

上述したように、ファイバ入射端においては非線形効果が支配的で、出射端においては分散効果が支配的であるような状況は、（正常）分散値を長手方向に増大させる方法の他に、分散値が一定で、非線形定数を長手方向に減少させる手法がある。なお、ファイバの非線形定数を減少させる場合、長手方向に連続的に減少させる以外は、ステップ状のプロファイルを持つように特性を変化させる手法や、櫛形にプロファイルを持つように特性が変化するように非線形定数が制御されていれば良い。

次に pulse roller 2 0 4 の他実施例について説明する。図 2 9 B および図 2 9 C は、図 2 9 A の他実施例である。ND I F（図 2 9 A 参照）の代替として、分散値・非線形係数が異なる 2 種類以上の光ファイバを組合せた分散マネジメント光ファイバ 2 6 0（ステップ型および櫛型分散プロファイルファイバ）を用いた pulse roller 2 0 4 である。

図 2 9 B および図 2 9 C のファイバの内、いずれかを有する pulse roller 2 0 4 も図 2 9 A の pulse roller ファイバ 2 6 0 を有するものと同様の作用・効果を有する。つまり、いずれの pulse roller 2 0 4 も、入力端側の部分では非線形効果の作用が支配的であり、出力端側の部分では分散効果の作用が支配的である。

図 2 9 B、図 2 9 C に示す pulse roller 2 0 4 は、pulse roller ファイバ 2 6 0 が、非線形効果が支配的となる光ファイバと、分散効果が支配的な光ファイバとを順に配置させた組合せである。

次に、pulse rollerファイバ260が2種の光ファイバから構成されるpulse roller204を用いたパルス矩形化の一実験構成例を図30Aに示す。160GHz繰返しの2psパルス列をpulse rollerファイバ260に入力する構成である。このpulse rollerファイバ260の分散プロファイルを図30Bに示す。図30Bは、横軸が光ファイバの長さであり、縦軸が分散値である。なお、図30Bに示すpulse rollerファイバは、HNLFとNDFとから構成され、HNLFの長さが200m、分散値が $D = -0.7 \text{ ps/nm/km}$ であり、NDFの長さが80m、 $D = -7.5 \text{ ps/nm/km}$ である。

ここでは、非線形効果が支配的となる光ファイバに高非線形ファイバ (highly-nonlinear fiber: HNLF) を用いている。HNLFは、伝送路用ファイバが持つ非線形定数以上のそれを有する光ファイバである。このHNLFを用いることによって、光ファイバの短尺化が可能となる。なお、HNLFを用いる場合は、図29A～図29CのようなNDIFを用いずに一定分散値としても、通常のファイバを用いた場合と比較して、短尺化が可能である。

次に、図30Bのpulse rollerファイバにおける2psパルス伝搬シミュレーションの結果を図31に示す。実線が出力パルスの実時間波形であり、それに対応する自己相関波形が破線で示されている。 P_0 は入力ピークパワーである。 $P_0 = 23.5 \text{ dBm}$ において実線で示された出力パルス波形が矩形化されていることが示されている。その時の自己相関波形（破線）は三角状となる。

これらに対して、白丸が自己相関波形の実験結果である。実験では160GHzパルス列を用いている為に、パルス裾部分のパルス重なりが生じる領域では白丸と破線の乖離が大きいものの、パルス中心部分では両者が良く一致することが示されている。従って、実験でもシミュレーションと同様に $P_0 = 23.5 \text{ dBm}$ において実線で示された矩形化パルスが得られていると考える。

上述したpulse roller 204を光スイッチ部（図24を参照）の前段に配置することによって、時間再生装置・時間分割装置の高性能化が実現可能である。つまり、図24を参照すると、第一のカプラと光スイッチ部の間、もしくは光LO発生器と光スイッチ部の間に配置されることになる。その一実施例を図32に示す。

図32では、上述したpulse roller 204は、光スイッチ部222の前段に配置され、外部信号光あるいはクロックパルスをもpulse roller 204によって矩形化した後、光スイッチ部222にて光スイッチする構成である。なお、この場合、光スイッチ部222の構成は、図24に示したようなFWM構造に限定されず、NOLM型、SOA (semi-conductive optical amplifier) 型としても良い。

一方のパルスが矩形化されている為、外部信号光のタイミングジッタによる両者の相対時間位置ズレからの強度揺らぎへの変換が抑圧される。この原理は前述（図39）した通りである。矩形化パルスの平坦幅がこの抑圧範囲に相当する。

ここでは前述のpulse roller 204とOPLL 220を組合せたクロック抽出器の実施例を記述する。その構成を図33に示す。pulse roller 204と図24内のクロック抽出器から成る。

信号光パルスはpulse roller 204によって矩形化された後に、その矩形化パルスと光LOをFWM部に入力する。そこで発生するFWM光を受光部で電気信号に変換する。本発明の一つの特徴は、このFWM光を誤差信号と認識する方式にpulse rollerの出力パルス特性を利用する点である。

図24に示す光スイッチ部では、入力信号光と光LOのピーク値の設定が重要となる。光スイッチ出力の平均パワーの変化から入力信号光と光LOの位相差を検

出する為には、両者のピークの時間位置をズラす必要がある。

図 2 4 に示す光スイッチ部において、図 2 6 に示した光受光部を使用する場合、光の平均強度を利用して位相検出を行うため、光スイッチ部と光 L O の光信号のピークの時間位置を等しくする必要がある。このため、図 2 4 に示した光スイッチ部は、O P L L と別々に動作させる必要がある。

また、周波数変調が加えられた光 L O からの出力光により位相検出を行う方法は、入力パルスピークと光 L O からの出力光の強度ピークが平均的には一致するが、各パルスのピーク同士の時間差は変調周波数で変化する。さらに、光 L O からの出力光は、周波数変調が加えられているため、複数回、光再生を行うたびにタイミングジッタが積算される場合がある。

これらに対し、図 3 5 A および図 3 5 B に示す光受光部では、F W M 光のスペクトルによる位相検出は、平均値処理でありながらピーク値が一致する。そのため、光スイッチ部と O P L L の両方の機能を一度に行うことができる。

典型的な pulse roller 出力パルスの時間波形とチャープ（瞬時周波数の時間変化）特性をそれぞれ図 3 4 A、3 4 B の最上部に示す。一般に、正常分散と非線形効果の相互作用によって矩形化されるパルスには線形チャープが蓄積される。このパルスと変換限界パルス（図 3 4 A、図 3 4 B の中央部）から発生する F W M 光も線形チャープを有する。この F W M パルス特性を図 3 4 A、図 3 4 B の最下部に示す。

矩形パルスが線形チャープを有する為、入力パルス間の時間ズレが出力 F W M 光の周波数ズレに変換される。よって、この F W M 光の周波数ズレをモニタリングすることで入力パルス間の位相差を認識できる。F W M 光から位相差を認識する光受光部を図 3 5 A、図 3 5 B に示す。

この光受光部は、図 3 5 A に示すように、分波器 2 6 2 と、2 つ以上の光フィルタ 2 6 4 (図 3 5 A では 3 つ配置) と各フィルタ出力光パワー比較器 2 6 6 とから構成される。この分波器 2 6 2 と複数の光フィルタ 2 6 4 の代わりに、図示しないが、AWG (arrayed waveguide) を用いることも可能である。

この光受光部では、まず FWM 光を分波器 2 6 2 で 3 分波し、各光波を異なる透過周波数を有する光フィルタ 2 6 4 に入力する。各フィルタ出力パワーの差は FWM 光の周波数ズレ、即ち光位相比較器入力パルス間の時間ズレ、に対応する。従って、このパワー差のモニタリングによってパルス間の時間位置ズレを認識することができ、これに基づき光 LO の周波数を調整する。なお、図 3 5 B は図 3 5 A に示した光受光部の他実施例であり、グレーティングと PD からなる。図 3 5 B の光受光部は、図 3 5 A と同様の効果を有する。

矩形化パルスを用いた OPLL 動作の応用として、図 6 1 に示すようにパルス振幅を時間的に変化させ、時間位置のずれを強度ずれとして検出することによる OPLL 動作も可能である。図 6 1 のように、矩形パルスの振幅を時間的に変化させる方法としては、利得ピークとなる位相を矩形パルスの中心から少しずらした、同期変調を行うなどの方法が考えられる。

図 3 2 で述べたような、pulse roller 2 0 4 と optical switch 2 2 2 の組み合わせは、図 1 7 に述べたような再生装置 2 0 0 としてのみではなく、高品質な繰り返し特性を持つ、OTDM 信号発生器にも、応用可能である。

図 6 2 は、OTDM 信号発生器の全体図を示している。繰り返し周波数が $N \times f$ [GHz] のパルス光源 6 0 4 は、繰り返し特性が非常によく、情報が載せられていない。一方、パルス光源 6 0 6 は、繰り返し周波数が f [GHz] であり、 N チャンネルの光時分割が可能ほど時間幅が圧縮されており、さらに f [Gbit/s] のデータ変調が行わ

れているものとする。パルス光源 604 および N 個のパルス光源 606 は、すべて発生した電気クロック信号 602 と同期が取れているものとする。なお、図 62 では、パルス光源 604 とパルス光源 606 を同期させるために電気クロック信号 602 を利用したが、これに限定されない。例えば、ビート光などの光信号を利用することができる。

N 個のパルス光源 606 から発生された情報信号は、光時分割多重器 608 で時分割多重化される。パルス光源 606 と光時分割多重器 608 の組み合わせは、従来用いられているものであるが、一般にタイミングジッタを持つなど、繰り返し特性が極めて高いとは言えない。光時分割多重器 608 で多重化された信号は、矩形化器 610 で矩形化される。

一方、パルス光源 604 で発生された光信号は遅延線 612 によって、矩形化器 610 の出力信号と時間的な位置を合わせられ、合波器 614 で合波された後、パルススイッチ 616 によって、OTDM された論理信号のみがパルス発生器 604 で発生された光パルスにコピーされ、その結果繰り返し特性がパルス発生器 604 で得られたパルスと同等の、高品質なものが得られる。

遅延線 612 は矩形化器 610 の前後に配置してもよいし、光時分割多重器 608 内に組み込んでもよい。また、矩形化器 610 での効率を上げるため、その前にソリトンコンバータが挿入されていてもよい。

次に、本実施例の雑音除去装置である soliton purifier 208 を図 36A に示す。ソリトンファイバ 272 が 2 台の光フィルタ 270、274 の間に配置される構成である。

まず、soliton purifier 208 の動作を簡単に述べる。まず、BPF 270 によって信号帯域以外の帯域の雑音を除去し、次いでソリトンファイバ 272 中のラマ

ン自己周波数シフト現象を用い、信号スペクトルをBPF 270の帯域以上の量を周波数軸上でシフトさせる。このとき、元の信号帯域に存在していた雑音は周波数シフトせず、ソリトンと雑音の分離が可能である。最後にBPF 274で再び信号帯域外の雑音を除去する。結果的に信号の雑音が大きく低減される。

soliton purifier 208に入力される光信号パルスは、入力側光フィルタ 270によって信号光帯域外の雑音が除去される。その後、異常分散性を持つソリトンファイバ 272に入力される。このソリトンファイバ 272では、ソリトンが帯域内において、誘導ラマン散乱による利得の傾き（以後利得スロープと呼ぶ）を感じるように制御されている点が重要である。この利得スロープの存在の結果として、ソリトンが波長シフトする。この現象は、ソリトンのラマン自己周波数シフトとして知られている現象である（Mitschke et al., Opt. Lett., vol.11, p. 659(1986). およびGordon, Opt. Lett., vol.11, p. 662 (1986).）。波長シフトしたソリトンは出力側光フィルタ 274によって抽出される。

ここで本発明の特徴は、ソリトンの波長シフトを効率良く実現する為に利得スロープが制御されている点である。本実施例では、以下の2つの手法が成されている。

一つ目の手法は、ソリトンファイバとしてHNLFを活用した点である（図36B）。ファイバにソリトンが伝搬すると、ソリトン自身がポンプとなり低周波側にラマン利得を形成させる。その利得スロープをソリトン自身が感じたことによって、ソリトンの中心周波数が低周波側にシフトする。この現象がソリトン自己周波数シフト（soliton self-frequency shift: SSFS）である。一般的な、HNLFにおけるラマン利得を図37Aに示す。比較の為にSMFのラマン利得も示す。

HNLFは、SMFに比べて大きな利得スロープを有する為、ファイバ長が短く

でもSSFS効果が増強され得る。従って、HNLFを使用することにより、ファイバを短尺化することが可能となり、その結果としてファイバ損失が低減されるだけでなく、ソリトン間の相互作用も抑圧され得る。

二つ目の手法は、外部ポンプ光によってラマン増幅する点である（図36C）。図36Cでは、ポンプ光発生器の配置を前方と後方とした。このポンプ光発生器の配置は、前方・後方のいずれ、もしくは両方でも構わない。

この構成のsoliton purifierは、外部ポンプ光による増幅調整を通じてSSFS効果のコントロールを行うものである。図63は、ラマン増幅器による増幅利得と、ソリトンのスペクトルの関係を、周波数軸上で記述したものである。ポンプ光の周波数を ν_p とすると、ラマン増幅利得は約 $\nu_p-13\text{THz}$ でピーク値をとる。一方、周波数に対する利得のスロープが最大となるのは、約 $\nu_p-10\text{THz}$ なる周波数であるが、ソリトンの中心周波数 ν_s をこの値に設定することで、SSFSの効果が最大限に増強される。また、SSFSによってシフトさせたい周波数の量を $\Delta\nu$ とおくと、 $\nu_s - \Delta\nu = \nu_p - 13\text{THz}$ と設定することで、ソリトンの周波数シフト量を制限することができる。

単位伝搬距離に対する、ソリトンの自己周波数シフトの量は、パルス幅の4乗に逆比例することが知られている。そこで、soliton purifier 208の前段にパルス圧縮器を挿入してパルスを圧縮することで、より効率的に周波数シフトを実現させることができる。

図36Cのように前方および後方励起ラマン増幅を行う際に、光電力が伝搬距離に対してゆるやかに増加し、断熱ソリトン圧縮が実現できるように設計することで、パルスは伝搬中に圧縮され、やはり効率的に周波数シフトさせることができる。

繰り返し特性のよい光ソリトン列を用いた全光非線形信号処理を考えた場合、信号帯域付近の雑音が増幅されることが問題となる。図6-7は、繰り返し周波数が160GHzで、パルスの半値幅が1psである光ソリトン列が、2kmのHNLFを伝搬するときの入力および出力スペクトルを表し、実験により得られたものである。図6-7からわかるように、中心周波数付近の雑音が増幅されている様子がわかる。使用したHNLFの分散値は、図6-9に示すように、約3.5ps/nm/kmから約1.8ps/nm/kmへと連続的に減少していて、非線形性は $21.8\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、損失は1dB/kmである。図6-9において、直線(a)は、測定で得られた分散値を直線近似したもので、分散値 D [ps/nm/km] と距離 z [km] が、 $D=3.5-0.9z$ の式で表せる関係にある。一方、曲線(b)は、 $D=3.25\times 10^{-0.1z}$ の式で表せる関数であり、 D の値が減少する割合は、1dB/kmである。つまり、図6-9から、ファイバの分散値は長さに対してほぼ直線的に減少しているが、距離が短いために指数関数でも近似することができ、その際の減少の割合は1dB/kmであり、ファイバの損失値の減少する割合である1dB/kmと一致しているとみなせる。伝搬距離に対して、ファイバ損失による光電力の減衰量と、分散値の減衰量がつりあっている場合、伝送系は無損失と等価であるとみなすことが出来るため(K. Tajima, "Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss," Opt. Lett., vol. 12, pp. 54-56, 1987.)、このファイバでは基本ソリトンが1.6kmの実効距離にわたって、無損失でファイバを伝搬していることと等価である。図6-7における雑音増幅は、繰り返し特性の極めて高い光パルス列の離散スペクトルによる、パラメトリックプロセスに起因するものである。Duty比(=パルスの半値幅÷パルス間隔)が大きい場合(0.2以上)、光ソリトン列は無損失で伝搬されるため、増幅された雑音のピーク利得は、Duty比と伝搬距離のみで決定される。

図6-4は、雑音増幅のピーク利得を、ビットレートと伝搬距離に対して数値計算により求めたものであり、パルス幅1psのソリトン列が、雑音とともにファイバ(分散値3[ps/nm/km]、非線形定数 $20[1/\text{km}/\text{W}]$)を伝搬することを想定している

。この場合の分散距離は0.1kmと計算され、図中の距離 L は、分散距離に対する比 Z に変換され、雑音増幅利得はDuty比と Z のみで決定される。例えば、繰り返し周波数を160GHz（duty比0.16）とし、そのときの雑音増幅を15dB以下に抑えたい場合、ソリトンが伝搬可能な最大距離は、図64より0.5km、すなわち分散距離の5倍までと判断できる。雑音増幅利得がDuty比と分散距離で規格化された距離の二つで決定されるという事実は、任意の物理スケールおよび、初期ソリトン電力に対して微小とみなせる任意の初期雑音電力の場合において真である。

一方、duty比が大きくなると、雑音増幅の様子は、ソリトン列の隣接パルス間位相差に依存する。図65は、ファイバとパルスについて前項と同様のパラメータであり、繰り返し周波数を320GHz、伝搬距離を1kmとおいた場合の出力パルス列のスペクトルを数値計算によって算出したものである。明らかに、同相パルス列よりも、隣接パルス間位相差が π であるCS-RZパルス列の方が、雑音増幅が抑圧されているのがわかる。

したがって、繰り返し特性がよいソリトン列を伝搬させることを考える場合、CS-RZ列を採用すると、雑音増幅が抑圧されることがわかる。なお図65の計算結果は、入力パルス列として繰り返し周波数が160GHz、パルス幅を2psとし、伝搬距離を4kmとした場合についても、同様の結果が得られる。

以上、再生装置の詳細を示してきた。上述したように、これらは、主に光ファイバの非線形効果が活用されるデバイス及びそれらの組合せである。一般に、光非線形効果は入力光偏波に依存する為、このようなデバイスに使用するファイバの偏波保持化によってデバイスの高性能化、および高安定化が図られる。その一形態を図66に示す。ポラライザ702と偏波保持ファイバ（PMF）704とからなる構成である。

入力光はポラライザ702によって単一偏波成分のみが通過し、PMF704に入

力される。ポラライザ702の通過偏波は、PMF704に対して最適化されている。ポラライザ702でのロスを低減化する為、ポラライザ702の前に偏波コントローラ706を配置し、その偏波コントローラ706によって入力光偏波状態を最適化するのが好ましい。以上のような非線形デバイスのPMの適正化は、性能向上をもたらすだけでなくデバイスの小型化にも有効である。PMF704は、ファイバ曲げ誘起のロスや複屈折の影響が小さい為、ファイバを巻くボビンの径の低減化が可能となる。ボビン小型化の結果としてデバイス寸法も小型化される。

したがって、本発明の波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法によれば、波長分割多重光通信システムにおける波長分割多重光の伝送速度を、例えばビットレート40Gbit/sを超えて高めることが可能であると同時に、波長分割多重光再生システムの小型化及び省電力化が可能である。

更に、本発明の波長分割多重光再生システムを備えた中継局を多段通過した場合にあっては、各中継局で波長分割多重光が確実に再生されることから、波長分割多重光の信号強度、波形、及びタイミング等の品質は常に維持される。その結果、本発明によれば、超長距離間の光通信システムを実現可能である。

よって、本発明の波長分割多重光再生システム及び波長分割多重再生方法の通信産業における利用価値は極めて大である。

請 求 の 範 囲

1. ソリトンコンバータ (Soliton Converter)、パルスローラ (Pulse Roller)、カーシャッタ (Kerr-shutter)、又はソリトンピュリファイア (Soliton Purifier) のうち少なくとも 1 つの機器を有する再生装置が備えられ、劣化した信号光を再生する光再生システム。
2. 前記再生装置の前段又は前記再生装置の内部に偏波コンバータが備えられたクレーム 1 に記載の光再生システム。
3. 前記再生装置の前段、又は、前記再生装置の前段に前記偏波コンバータが備えられた場合には前記偏波コンバータの前段に、分波装置が備えられたクレーム 1 又は 2 に記載の光再生システム。
4. 前記再生装置の後段に、合波装置が備えられたクレーム 1 から 3 の何れか 1 項に記載の光再生システム。
5. 前記再生装置の前段、前記再生装置の前段に前記偏波コンバータが備えられた場合には前記偏波コンバータの前段、又は、前記前記偏波コンバータの前段に前記分波装置が備えられた場合には前記分波装置の前段に、分散補償器が備えられたクレーム 1 から 4 の何れか 1 項に記載の光再生システム。
6. 前記再生装置の出射側に、前記再生装置により再生された信号光と他の信号光とを合波する合波装置が備えられたクレーム 1 に記載の光再生システム。
7. 前記再生装置が多段に接続されたクレーム 1 に記載の光再生システム。
8. 多段に接続された前記再生装置の間に光スイッチが備えられたクレーム 7 に記載の光再生システム。
9. 前記再生装置の前段で入力パワーの調整を行なうクレーム 1 から 8 の何れか 1 項に記載の光再生システム。
10. ファイバ長がソリトン周期の 2 倍以下である異常分散ファイバ (Anomalous-dispersion fiber: ADF) を有するソリトンコンバータが備えられた波形整形器。
11. 前記異常分散ファイバの後段に光フィルタが備えられたクレーム 10

に記載の波形整形器。

12. 前記異常分散ファイバの前段に光増幅器が備えられたクレーム10又は11に記載の波形整形器。

13. ソリトンコンバータの代わりに、Mamyshevフィルター又はNOLMが備えられた波形整形器。

14. 入射側にパルス圧縮器が備えられたクレーム10から13の何れか1項に記載の波形整形器。

15. 前記パルス圧縮器は、断熱圧縮方式を利用したクレーム14に記載の波形整形器。

16. 前記パルス圧縮器に、光ファイバの長手方向に分散特性が減少する分散減少ファイバが用いられたクレーム14に記載の波形整形器。

17. 前記パルス圧縮器に、光ファイバの長手方向に分散特性がステップ状のプロファイルを持つSDPFが用いられたクレーム14に記載の波形整形器。

18. 前記パルス圧縮器に、光ファイバの長手方向に分散特性が櫛状のプロファイルを持つCDPFが用いられたクレーム14に記載の波形整形器。

19. 前記パルス圧縮器に、長手方向に非線形特性が増大する光ファイバが用いられたクレーム14に記載の波形整形器。

20. 前記パルス圧縮器に、長手方向に非線形特性がステップ状のプロファイルを持つ光ファイバが用いられたクレーム14に記載の波形整形器。

21. 前記パルス圧縮器に、長手方向に非線形特性が櫛状のプロファイルを持つ光ファイバが用いられたクレーム14に記載の波形整形器。

22. 前記パルス圧縮器に、ラマン増幅器が備えられたクレーム14に記載の波形整形器。

23. ソリトンコンバータの代わりに、可飽和吸収特性を持つ可飽和吸収体を用いられた波形整形器。

24. 前記可飽和吸収体の位置を調整して、可飽和吸収特性を可変にする位置調整機構が備えられたクレーム23に記載の波形整形器。

25. 前記可飽和吸収特性が面内分布を有するクレーム23又は24に記載

の波形整形器。

26. 分波器と、OPLL(Optical Phase-Locked Loop)と、光スイッチ部と、が備えられたカーシャッタ。

27. 前記OPLLにおけるビットレート差を $\Delta\omega$ 、ループ長を $L_{L.O.P}$ とし、 v を光ファイバ中の光の速度、前記分波器と前記光スイッチ部とを接続したファイバの長さを L_{A-B} 、 n を光ファイバの屈折率、 X を任意の数とすると、

$L_{L.O.P}$ は、 $\Delta\omega (L_{L.O.P}) < v \cdot X / n \cdot L_{A-B}$ の関係が成り立つように決定されることを特徴とするクレーム26に記載のカーシャッタ。

28. 前記OPLLに、光LO信号を発生させる光LO発生器と、外部から入力される信号光と前記光LO信号の位相差を検出する位相比較器と、前記位相差に基づき前記光LO信号の周波数を調整する制御部と、が備えられたクレーム26又は27に記載のカーシャッタ。

29. 前記光位相比較器に、FWM光を発生させるFWM部と、光フィルタと、受光部が備えられたクレーム28に記載のカーシャッタ。

30. 前記FWM部に、高非線形光ファイバ、PPLN(Periodically-poled LiNbO₃) 又はSOA(Semi-conductive Optical Amplifier)のいずれかが用いられたクレーム29に記載のカーシャッタ。

31. 前記受光部は、前段にパルスローラが配置され、該受光部に入射されたパルスの周波数特性をモニタすることを特徴とするクレーム29または30に記載のカーシャッタ。

32. 前記LO発生器に、ビート光発生器が備えられたクレーム28に記載のカーシャッタ。

33. 前記ビート光発生器は、CW光を発生する2つ以上の周波数成分を持つ1台以上の半導体レーザと、前記CW光を合波する光カップラーと、が備えられたクレーム32項に記載のカーシャッタ。

34. 前記半導体レーザが直列駆動されたクレーム33に記載のカーシャッタ。

35. 前記ビート光発生器と前記光スイッチ部との間に、光ファイバ圧縮器

が備えられたクレーム 26 から 34 の何れか 1 項に記載のカーシャッタ。

36. 前記位相比較器に、PD (Photo Diode) と、Loop Filter と、LD コントロール部が備えられ、該 PD は、二光子吸収によって光電流が発生することを特徴とするクレーム 28 から 30 の何れか 1 項に記載のカーシャッタ。

37. 前記 PD は、シリコンアバランシェフォトダイオード (SiAPD) が用いられたクレーム 36 に記載のカーシャッタ。

38. 前記光スイッチ部に、FWM 部と、光フィルタと、位相調整部と、が備えられたクレーム 21 に記載のカーシャッタ。

39. 前記位相調整部が、環境温度の変化に対して位相調整量に変化しないように制御されたクレーム 38 に記載のカーシャッタ。

40. 前記位相調整量が、出力パルスに基づいてフィードバック制御されるクレーム 39 に記載のカーシャッタ。

41. 前記 FWM 部において、ポンプ光と信号光の周波数間隔 $\Delta \nu$ (離調量) と、入力ポンプパルスのスペクトル幅を $\Delta \nu_p$ と、入力信号パルスのスペクトル幅 $\Delta \nu_s$ 、の間に下式の関係性を有するクレーム 38 に記載のカーシャッタ。

$$\Delta \nu > \frac{|\Delta \nu_p + \Delta \nu_s|}{2}$$

42. 前記 FWM 部において、ファイバ長 ΔL と、入力ポンプパルスのスペクトル幅を $\Delta \nu_p$ と、入力信号パルスのスペクトル幅 $\Delta \nu_s$ 、の間に下式関係を有するクレーム 38 に記載のカーシャッタ。

$$\Delta L > \Delta \nu_p + (\Delta \nu_s / 2)$$

43. 前記 FWM 部において、ファイバ長 L が下式により定められるクレーム 38 に記載のカーシャッタ。

$$1 < \frac{L}{L_{NL}} = \gamma P_0 L$$

$$\gamma P_p L \leq \frac{3\pi}{2}$$

4 4. 前記FWM部において、ファイバ長Lが下式により定められるクレーム 38に記載のカーシャッタ。

$$\frac{L}{L_{SOD}} < \frac{1}{2}, \frac{L}{L_{TOD}} < \frac{1}{2}$$

$$\beta_3 < \frac{1.7628^3}{2} \frac{\Delta t_p^3}{L}$$

$$\beta_3 < \frac{1.7628^2}{4\pi} \frac{\Delta t_s^2}{L\Delta\nu}$$

4 5. Pumpパルス ($\Delta t_p, \Delta \nu_p$) とSignalパルス ($\Delta t_s, \Delta \nu_s$) において、

$$\Delta\nu > \frac{|\Delta\nu_p + \Delta\nu_s|}{2}$$

の式を用いて、スペクトル重なりを回避するための離調量 $\Delta \nu$ を定める行程と、
2 $\Delta \nu$ 以上のFWM帯域が得られるファイバ長Lを定める行程と、

$$1 < \frac{L}{L_{NL}} = \gamma P_0 L$$

$$\gamma P_p L \leq \frac{3\pi}{2}$$

の式を用いて、スペクトル波形歪が無くFWMを発生させるポンプピークパワー P_p を定める行程と、

$$\beta_3 < \frac{1.7628^3}{2} \frac{\Delta t_p^3}{L}$$

$$\beta_3 < \frac{1.7628^2}{4\pi} \frac{\Delta t_s^2}{L\Delta\nu}$$

の式を用いて、ファイバ伝搬に伴うパルス時間波形歪抑制に必要な3次分散値 β_3 を定める行程と、

を備えた手順で設計されたクレーム 38に記載のカーシャッタ。

46. クレーム29に記載の前記光位相比較器に備えられたFWM部と、クレーム38の前記光スイッチ部に備えられたFWM部とが共有され、更に、光LO発生器と、制御部と、が備えられたカーシャッタ。

47. 高非線形特性を有するパルスローラファイバが備えられたパルスローラ。

48. 前記パルスローラファイバが、長手方向に正常分布値が増大する特性を持つ正常分散増大ファイバであるクレーム47に記載のパルスローラ。

49. 前記パルスローラファイバは、長手方向に非線形値が減少する特性を持つ光ファイバであるクレーム47に記載のパルスローラ。

50. 前記パルスローラファイバは、長手方向に正常分散特性と非線形特性が異なる2種類以上の光ファイバを組合せた分散マネージメント光ファイバからなるクレーム47から50の何れか1項に記載のパルスローラ。

51. 前記分散マネージメント光ファイバで、長手方向に分散効果が支配的な光ファイバと、長手方向に非線形効果が支配的な光ファイバとが配置されたクレーム50に記載のパルスローラ。

52. 前記分散マネージメント光ファイバで、前記分散効果が支配的な光ファイバの分散特性と前記非線形効果が支配的な光ファイバの非線形特性とが、ステップ状のプロファイルとなるように配置されたクレーム51に記載のパルスローラ。

53. 前記分散マネージメント光ファイバで、前記分散効果が支配的な光ファイバの分散特性と前記非線形効果が支配的な光ファイバの非線形特性とが、櫛歯状のプロファイルに変化するように配置されたクレーム51に記載のパルスローラ。

54. クレーム48から51の何れか1項に記載のパルスローラと、クレーム38に記載の光スイッチ部とが備えられたOTDM信号発生器。

55. ソリトンファイバが2つの光フィルタの間に配置されたソリトンコンピュータ。

56. 前記ソリトンファイバにおいて、誘導ラマン散乱による利得の傾き（

利得スロープ) が制御され、ソリトンの波長シフトを実現するクレーム 5 5 に記載のソリトンピュリファイア。

5 7. 前記ソリトンファイバが、高非線形ファイバであるクレーム 5 5 又は 5 6 に記載のソリトンピュリファイア。

5 8. 外部ポンプ光を発生するポンプ光発生器が備えられ、前記外部ポンプ光により誘導ラマン散乱を発生させるクレーム 5 5 から 5 7 の何れか 1 項に記載のソリトンピュリファイア。

5 9. 入射側に更にパルス圧縮器が備えられたクレーム 5 5 から 5 8 の何れか 1 項に記載のソリトンピュリファイア。

6 0. ソリトン断熱圧縮を行いながら、誘導ラマン散乱を発生させるクレーム 5 8 又は 5 9 に記載のソリトンピュリファイア。

6 1. 光ソリトン列を用いた光非線形信号処理において、Duty 比 (パルス幅に対するパルス間隔の比) と分散距離によって、所定の雑音増幅利得における最大伝搬距離を定めるソリトン雑音の制御方法。

6 2. 変調方法として CS-RZ パルス列を用いたクレーム 6 1 に記載のソリトン雑音の制御方法。

6 3. クレーム 1 から 9 に記載の光再生システムが直列に多段接続された光伝送システム。

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2003年12月18日 (18.12.2003)

PCT

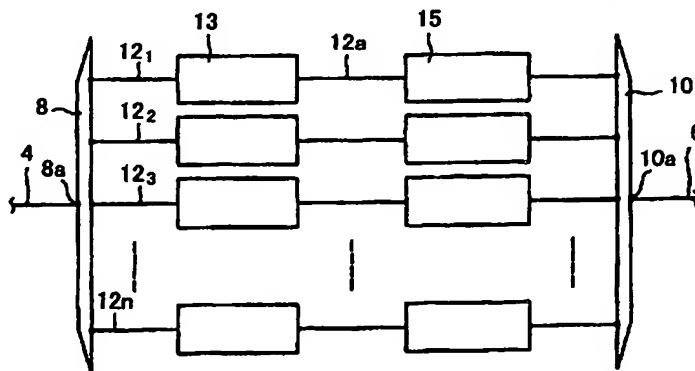
(10) 国際公開番号
WO 03/104886 A1

- (51) 国際特許分類: G02F 1/35, H04B 10/16 LTD [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP03/07433
- (22) 国際出願日: 2003年6月11日 (11.06.2003)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
 特願2002-170429 2002年6月11日 (11.06.2002) JP
 特願2003-055645 2003年3月3日 (03.03.2003) JP
 特願2003-125659 2003年4月30日 (30.04.2003) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 古河電気工業株式会社 (THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
 (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 五十嵐 浩司 (IGARASHI, Koji) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP). 松下 俊 (MATSUSHITA, Shunichi) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP). 並木 周 (NAMIKI, Shu) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP). 高坂 繁弘 (TAKASAKA, Shigehiro) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP). 井上 崇 (INOUE, Takashi) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP).

[続葉有]

(54) Title: WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEX OPTICAL REGENERATION SYSTEM AND WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEX OPTICAL REGENERATION METHOD

(54) 発明の名称: 波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法



(57) Abstract: An optical regeneration system for regenerating a degenerated signal light, comprising a regeneration device having at least one of a soliton converter, a pulse roller, a Kerr shutter and a soliton purifier. The soliton converter uses an anomalous-dispersion fiber (ADF) having a fiber length up to three times the soliton frequency, and the pulse roller is provided with a pulse roller fiber having high non-linear characteristics. The Kerr shutter comprises an optical LO (local oscillation) generator for generating an optical LO on an OPLL (optical phase locked loop), a phase comparator for detecting the phase difference between an externally-input signal light and an optical LO, and a control unit for regulating the repeated frequency of an optical LO based on the phase difference. The soliton purifier has a soliton fiber disposed between two optical fibers.

(57) 要約: 本発明では、ソリトンコンバータ (Soliton Converter)、パルスローラ (Pulse Roller)、カーシャッタ (Kerr-shutter)、又はソリトンピュリファイア (Soliton Purifier) の

[続葉有]



河電気工業株式会社内 Tokyo (JP). 飛岡 秀明 (TO-BIOKA, Hideaki) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP). 廣石 治郎 (HIROISHI, Jiro) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 川和 高穂 (KAWAWA, Takaho); 〒108-0073 東京都港区三田3丁目1-10 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 国際調査報告書
- 請求の範囲の補正の期限前の公開であり、補正書受領の際には再公開される。

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

うち少なくとも1つの機器を有する再生装置が備えられ、劣化した信号光を再生する光再生システムを供給する。ソリトンコンバータは、ファイバ長がソリトン周期の3倍以下である異常分散ファイバ (Anomalous-dispersion fiber: ADF) が用いられ、パルスローラは、高非線形特性を有するパルスローラファイバが備えられる。カーシャッタは、OPLLに、光LOを発生させる光LO発生器と、外部から入力される信号光と光LOの位相差を検出する位相比較器と、前記位相差に基づき光LOの繰返し周波数を調整する制御部とが備えられる。ソリトンピュリファイアは、ソリトンファイバが2つの光フィルタの間に配置される。

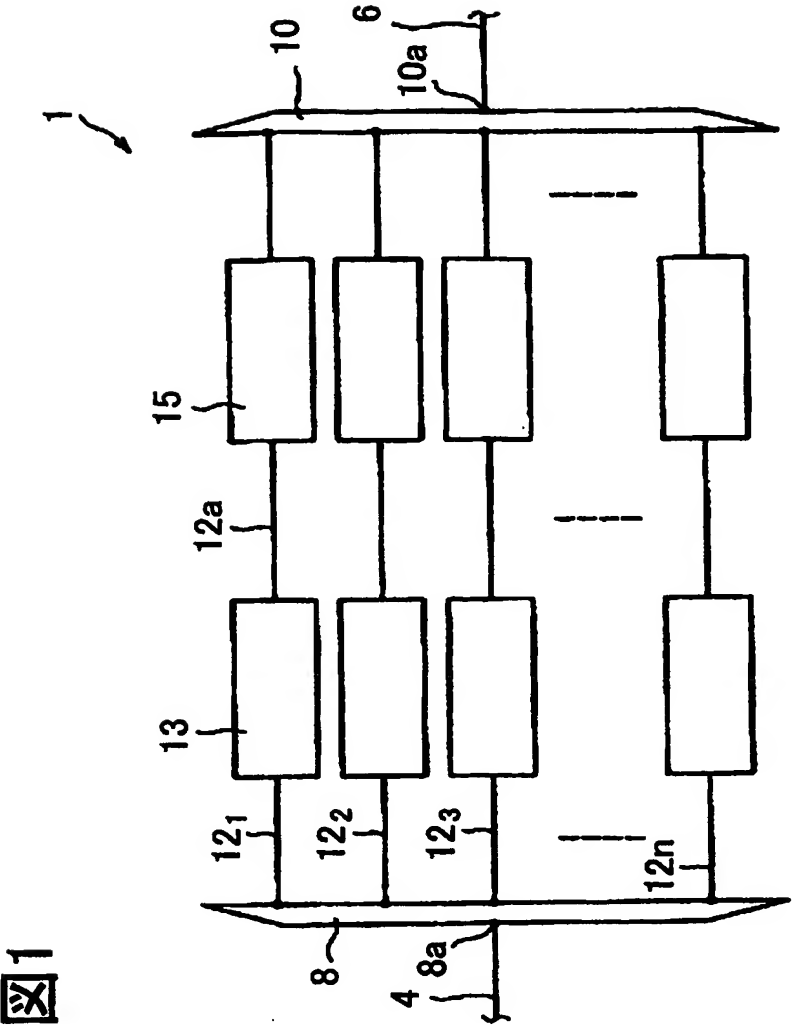


図1

図2

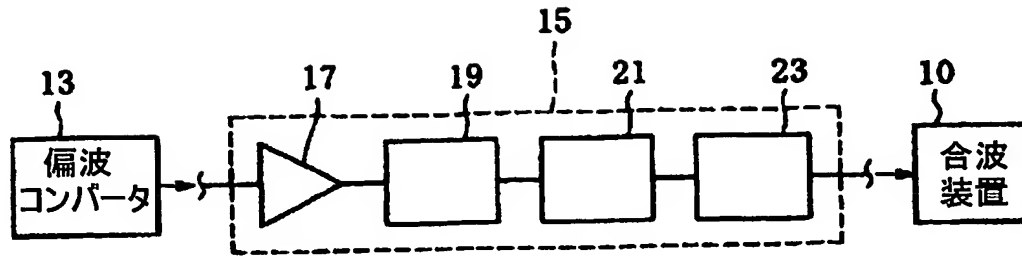


図3

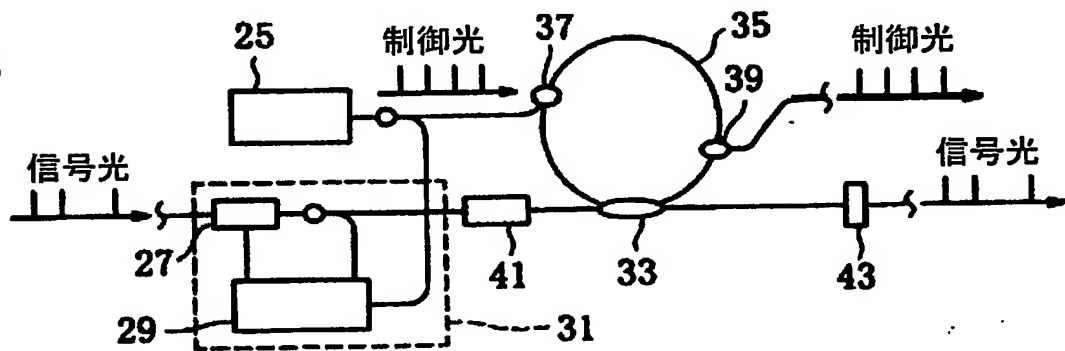


図4

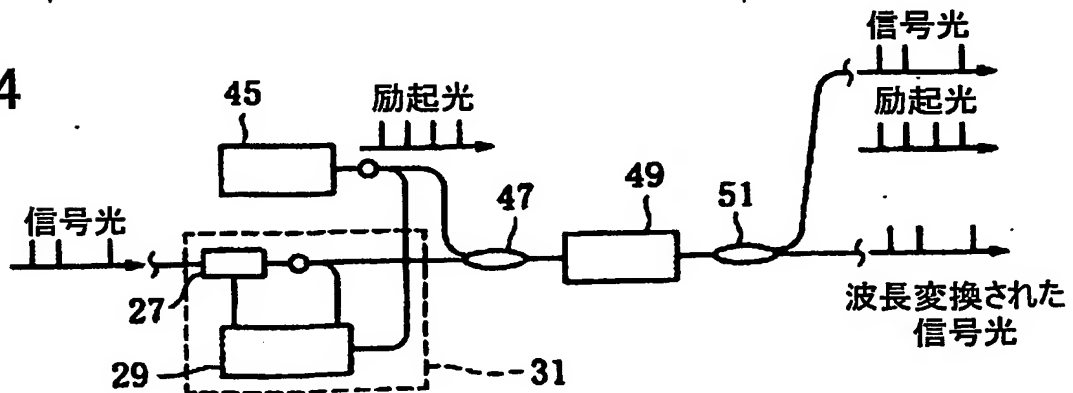


図5

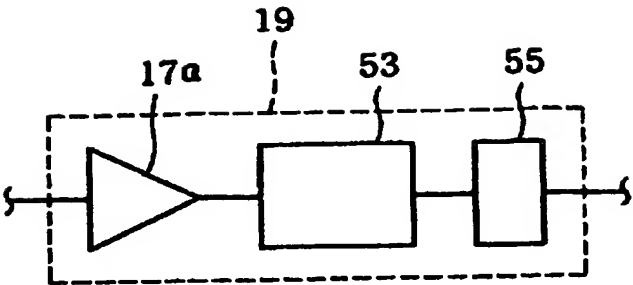


図6

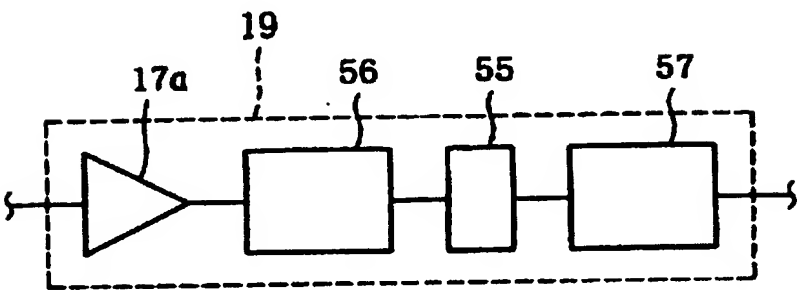


図7

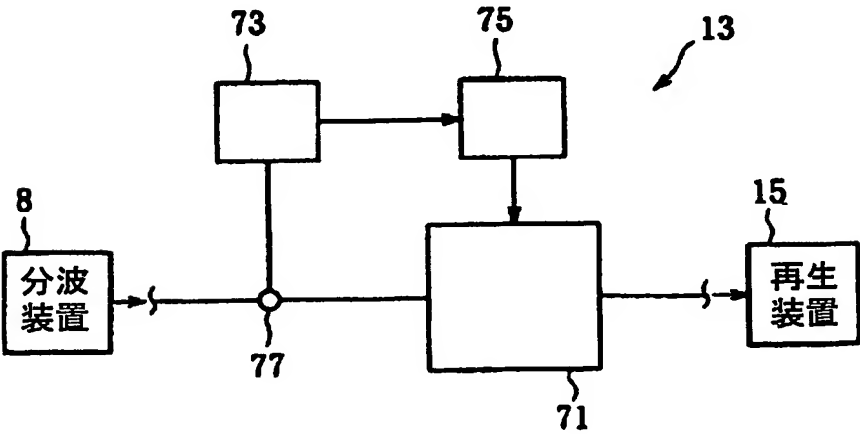


図8

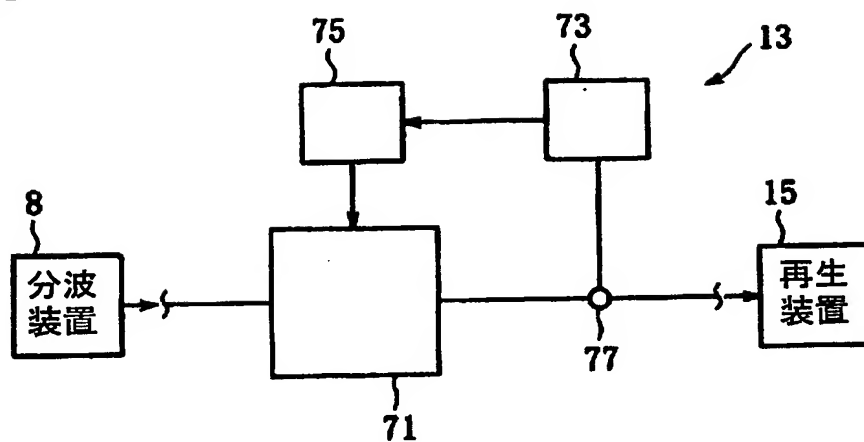


図9

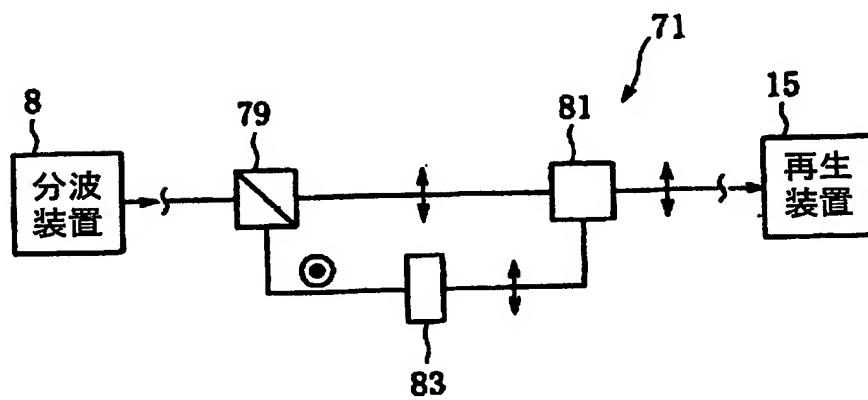


図10

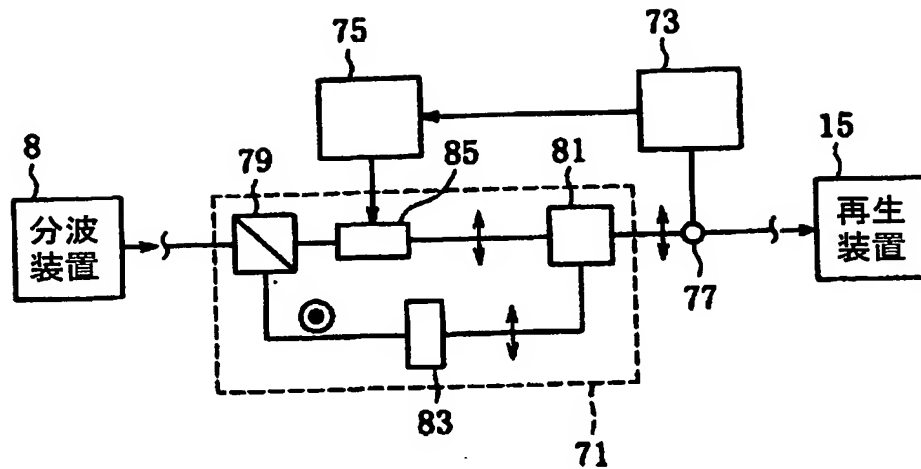


図11

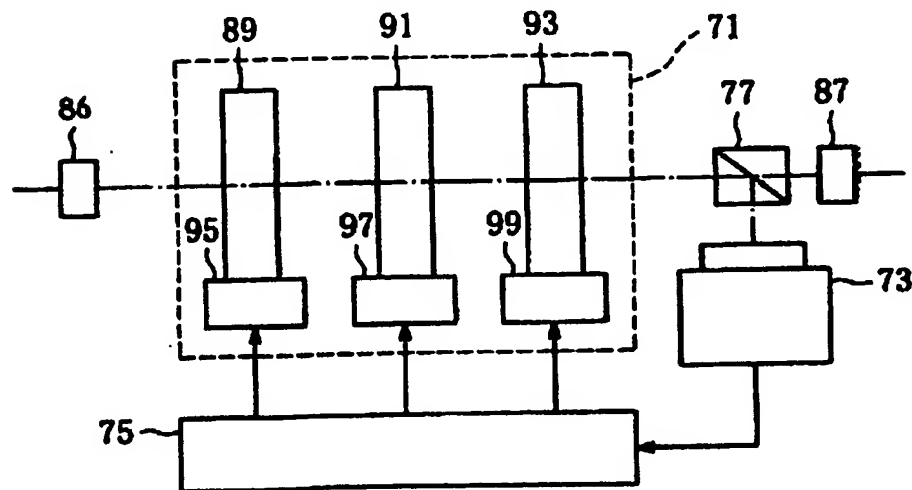


図12

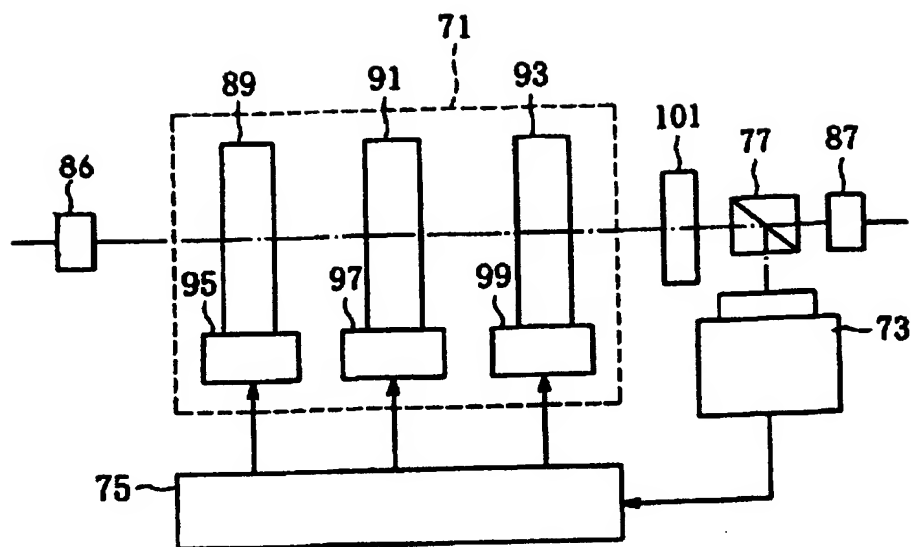
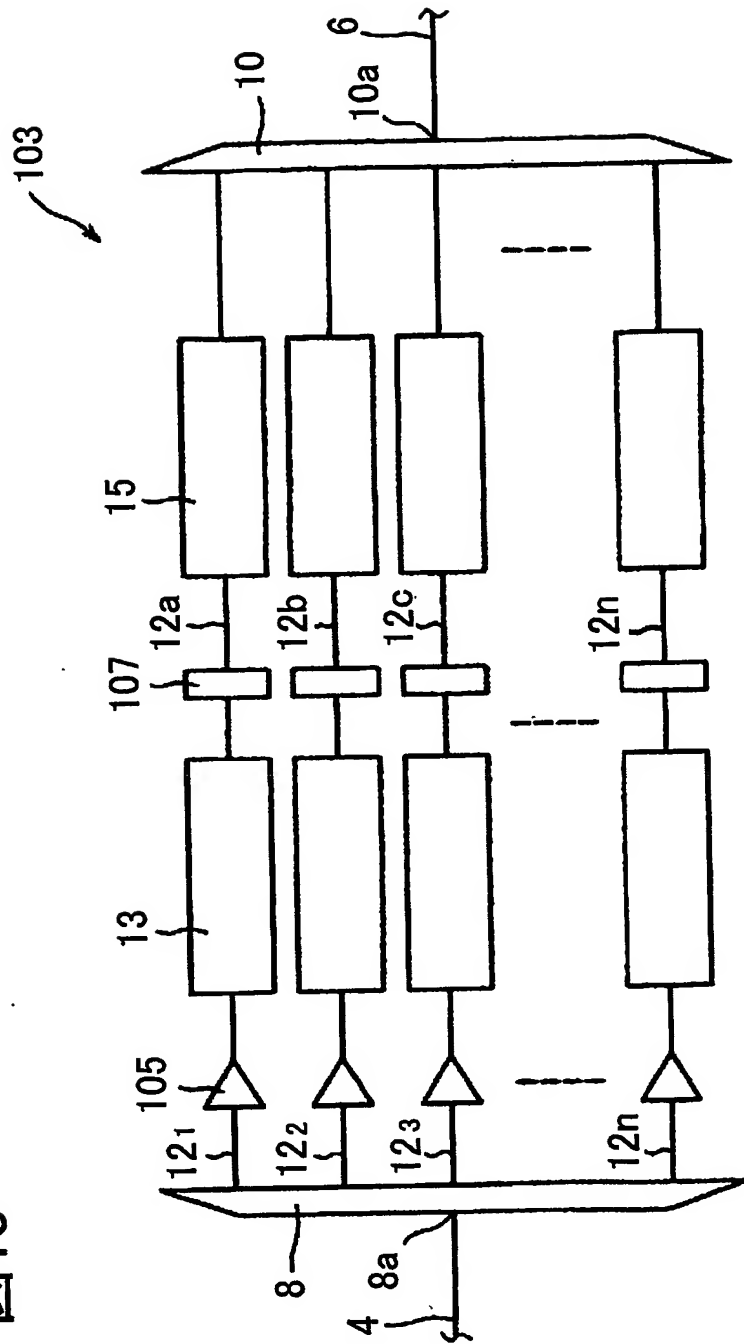
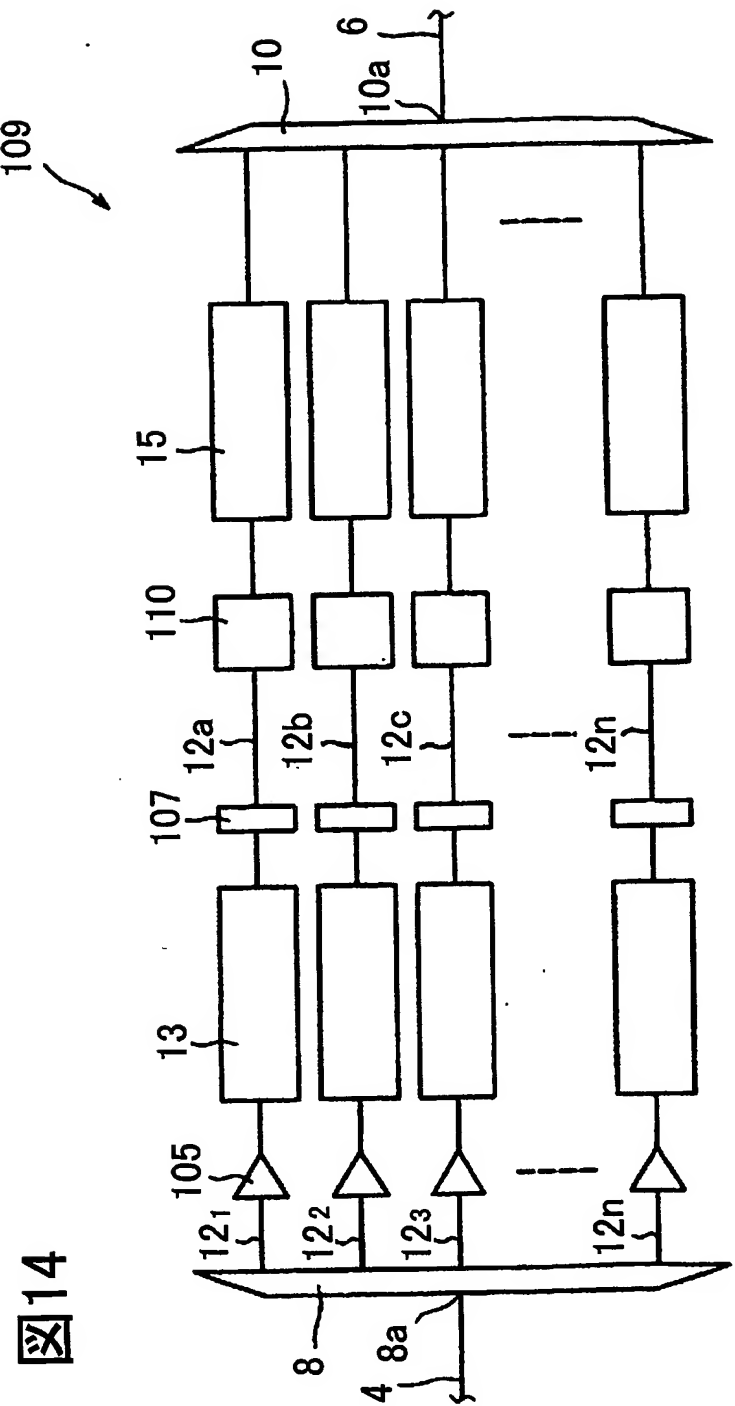


図13





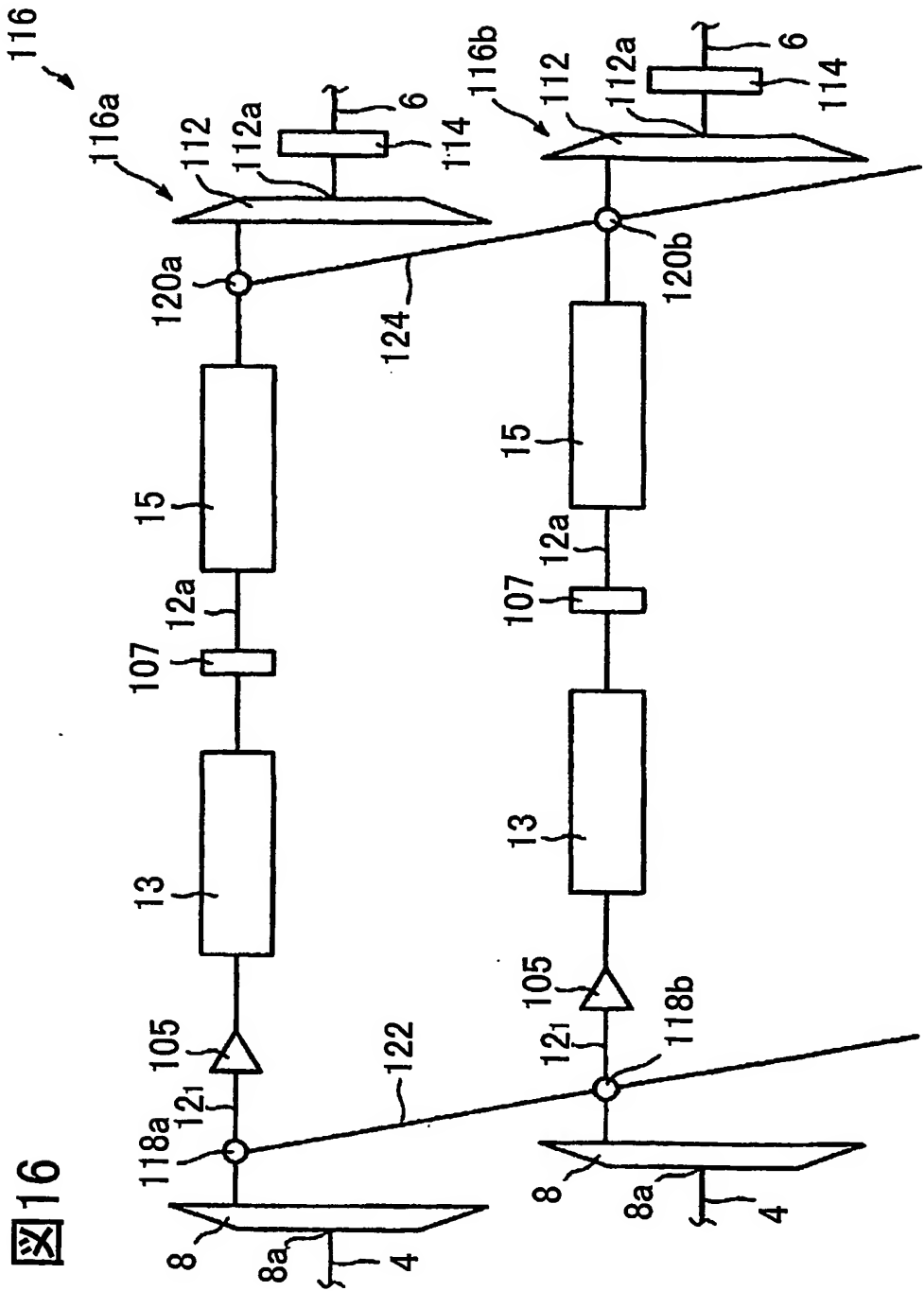


図17

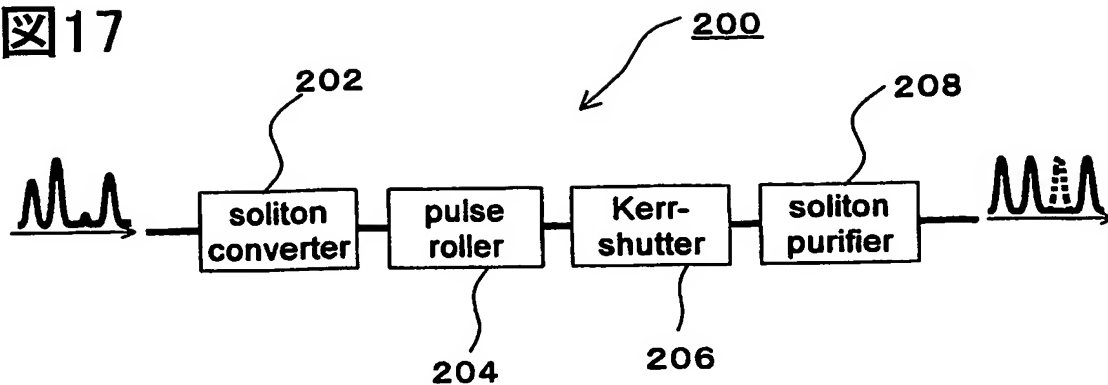


図18

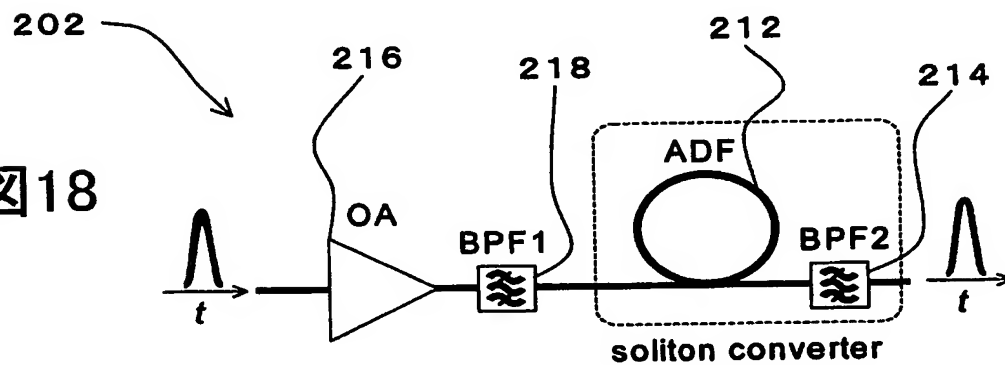


図19

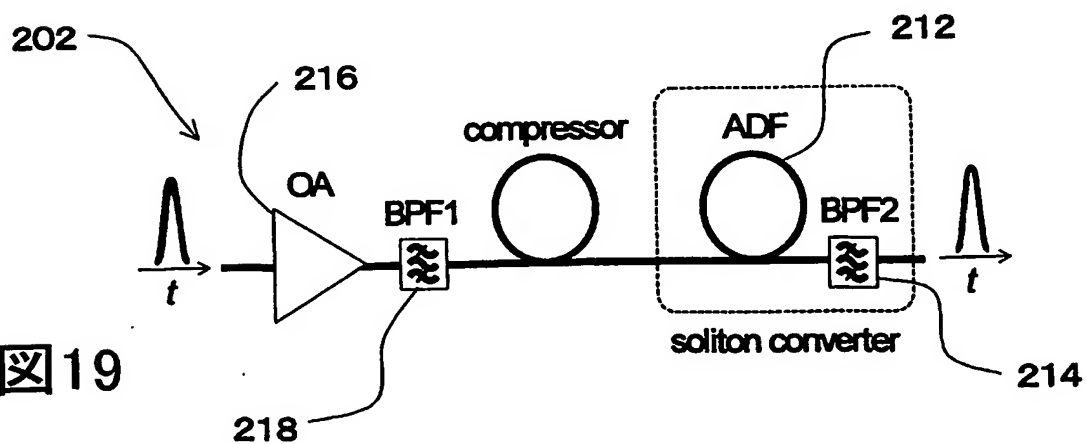


図20A

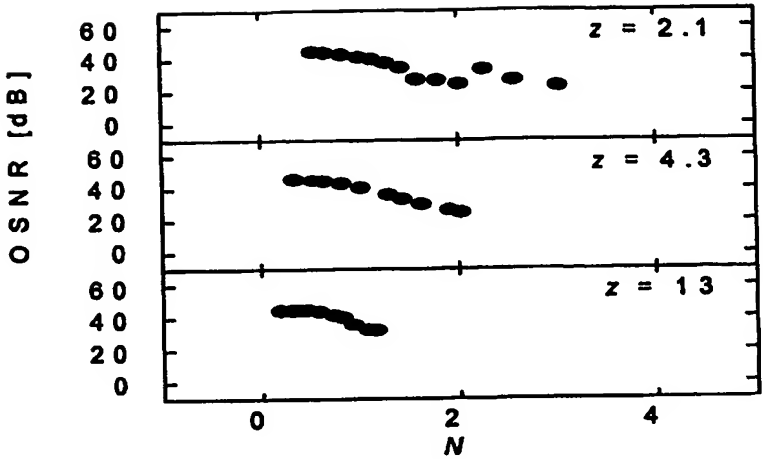


図20B

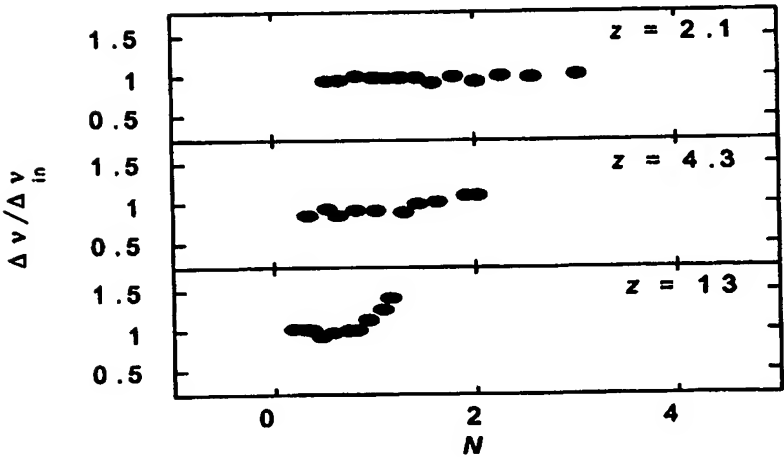


図21

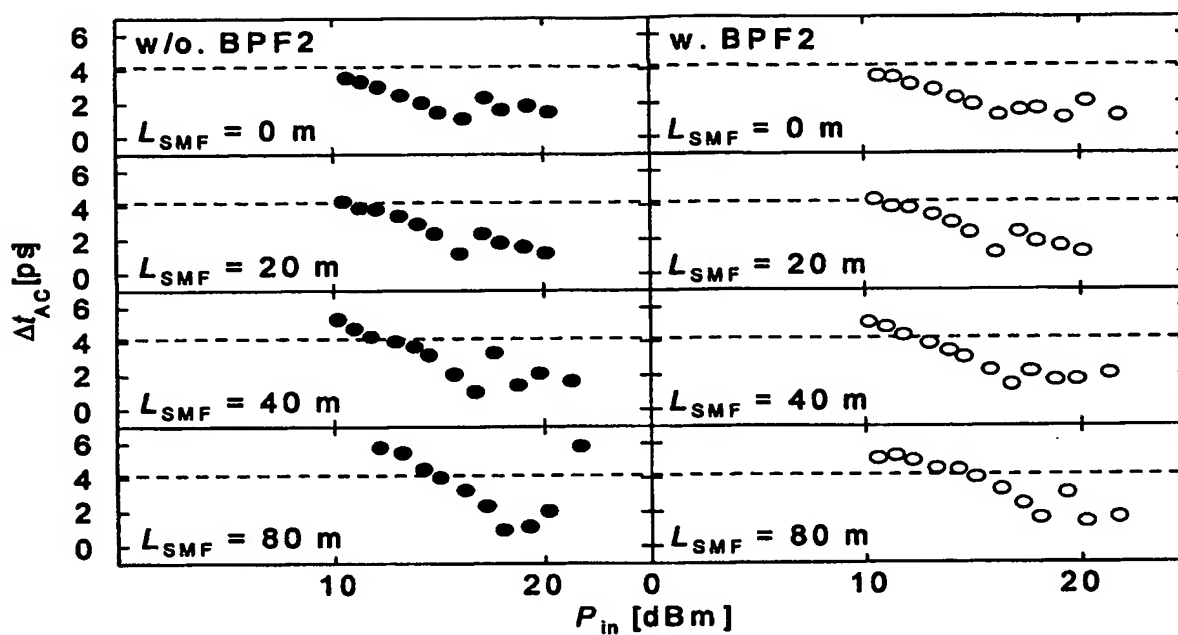


図22

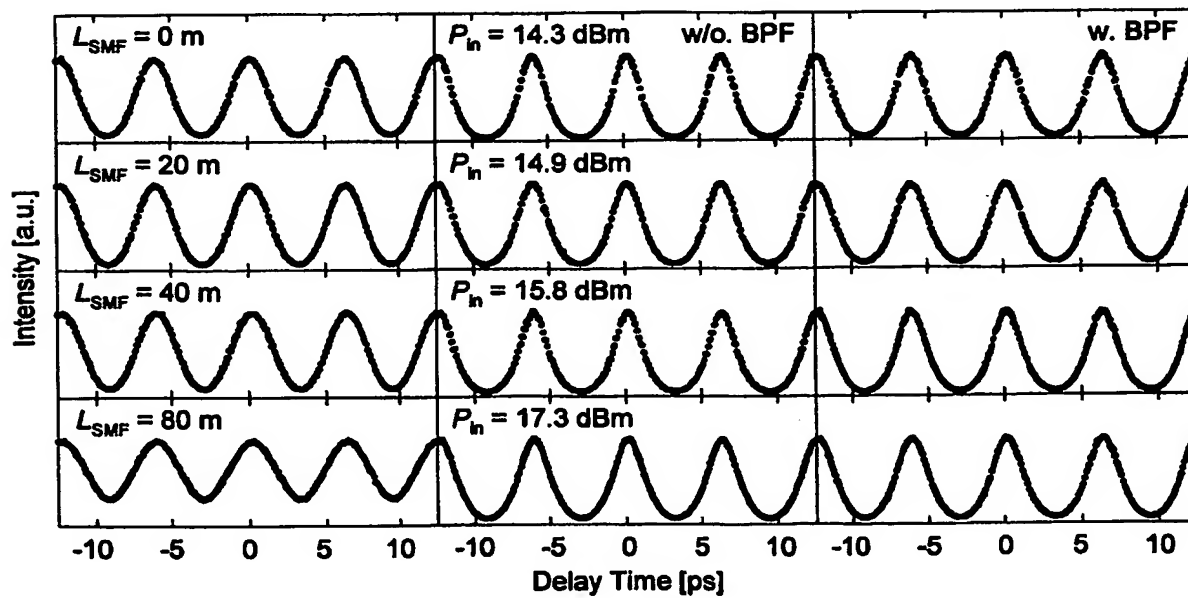


図23

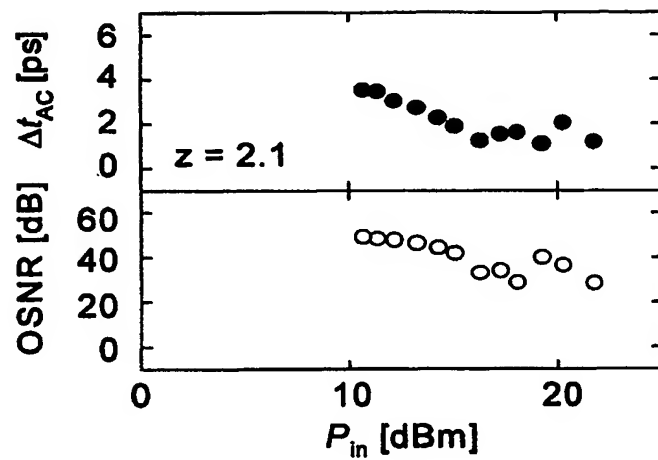


図24

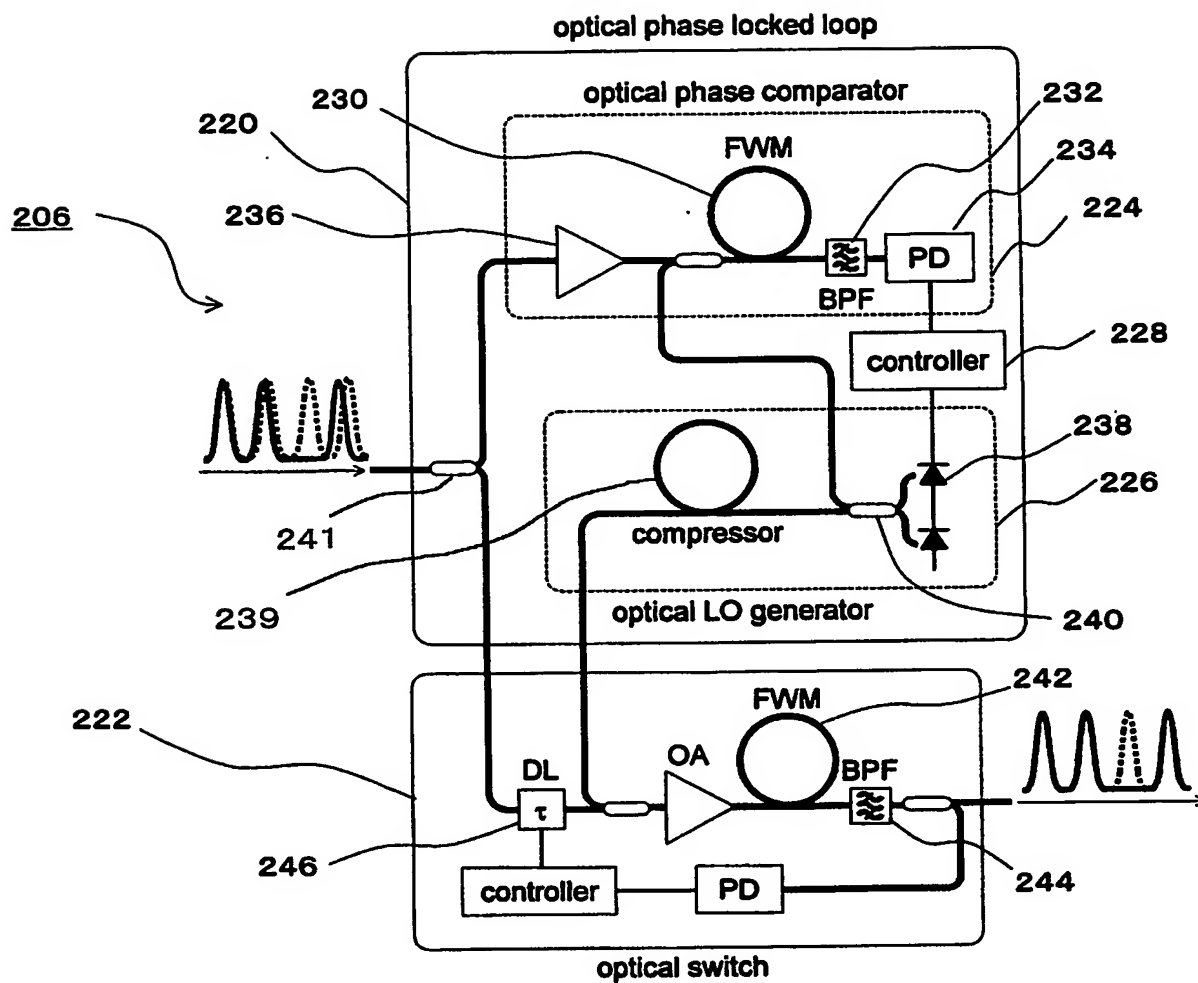


図25A

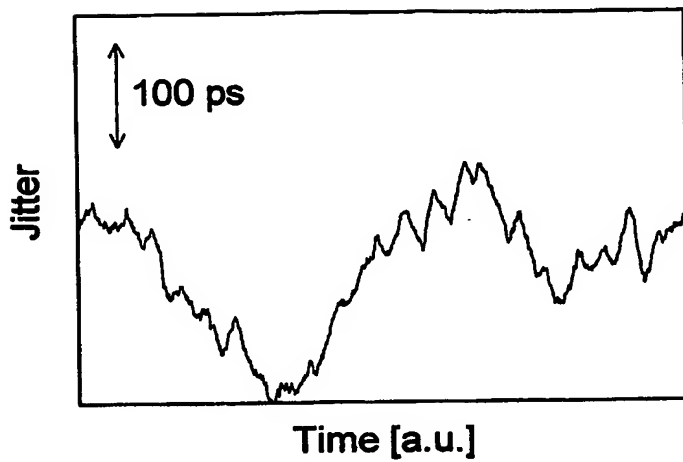


図25B

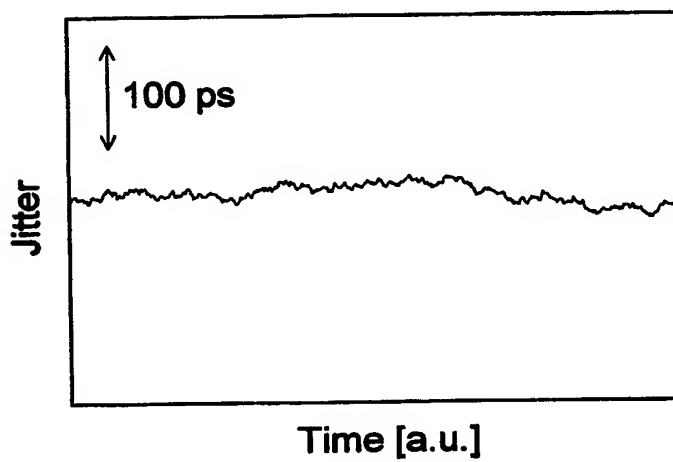


図26A



図26B

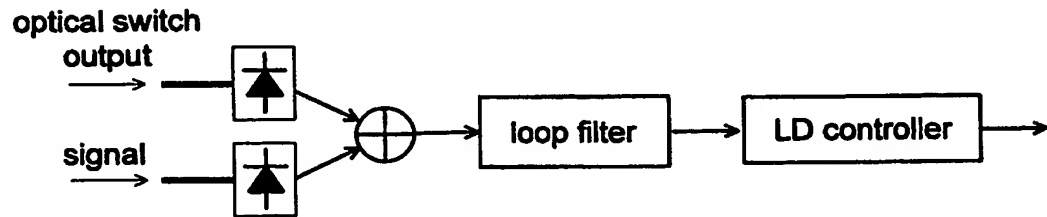


図26C

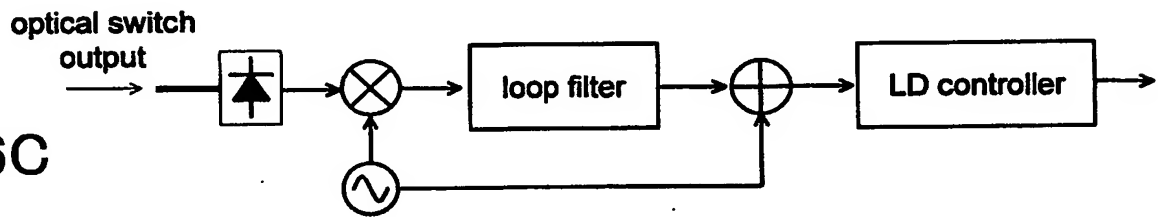


図27

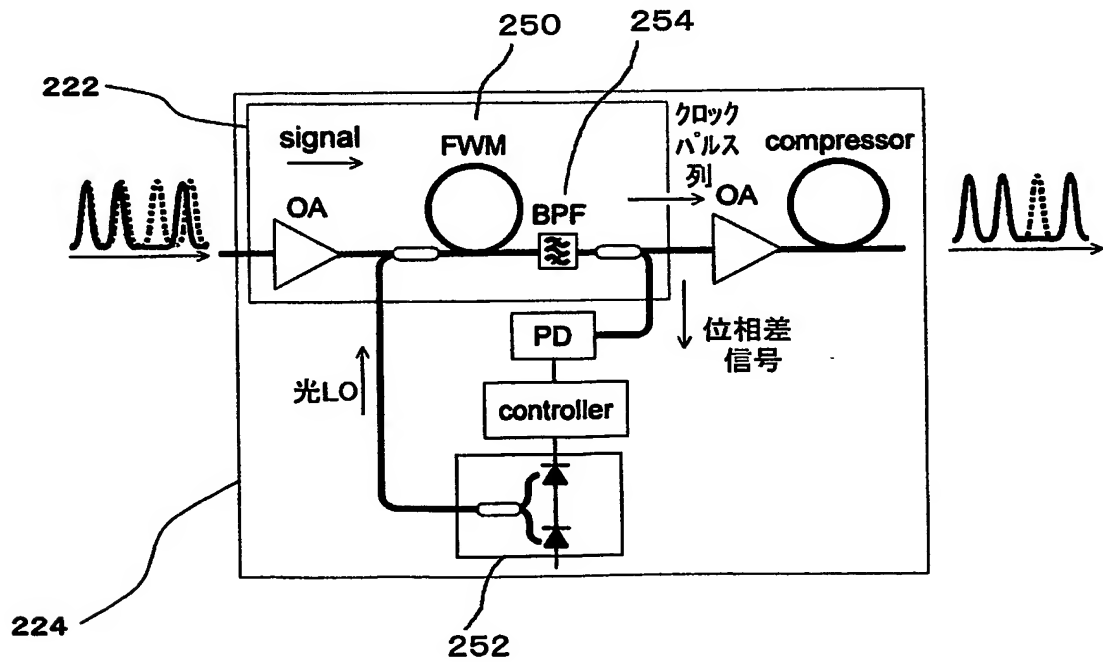


図28

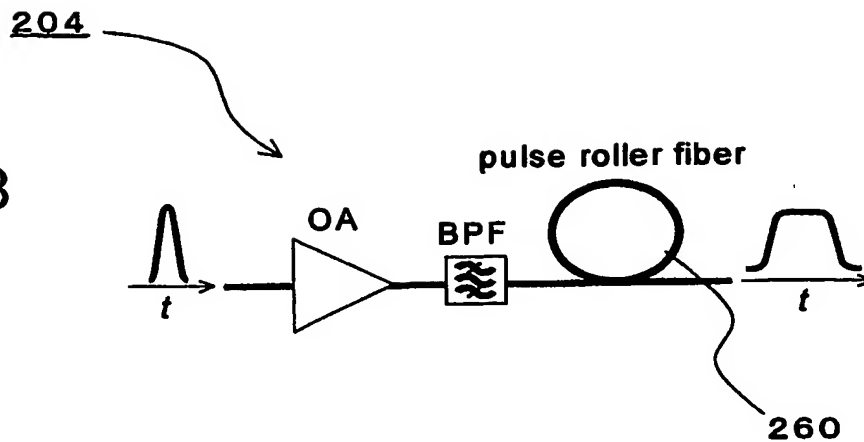


図29A

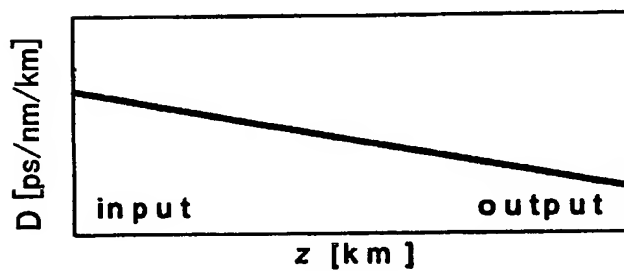


図29B

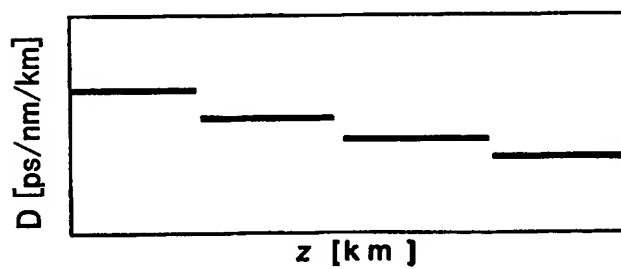


図29C

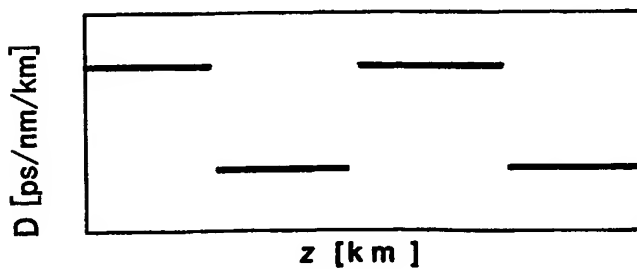


図30A

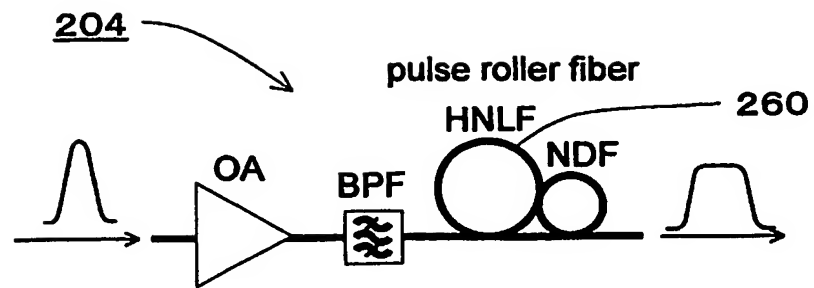


図30B

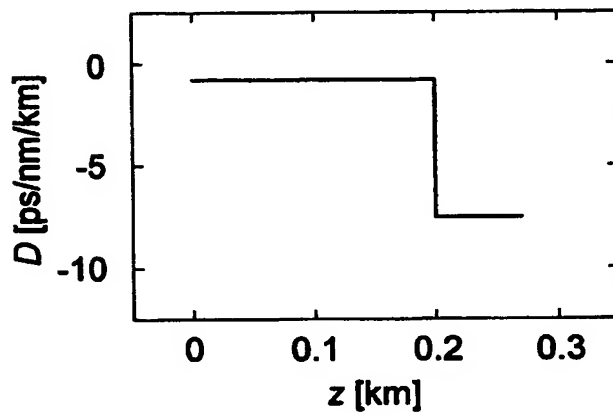
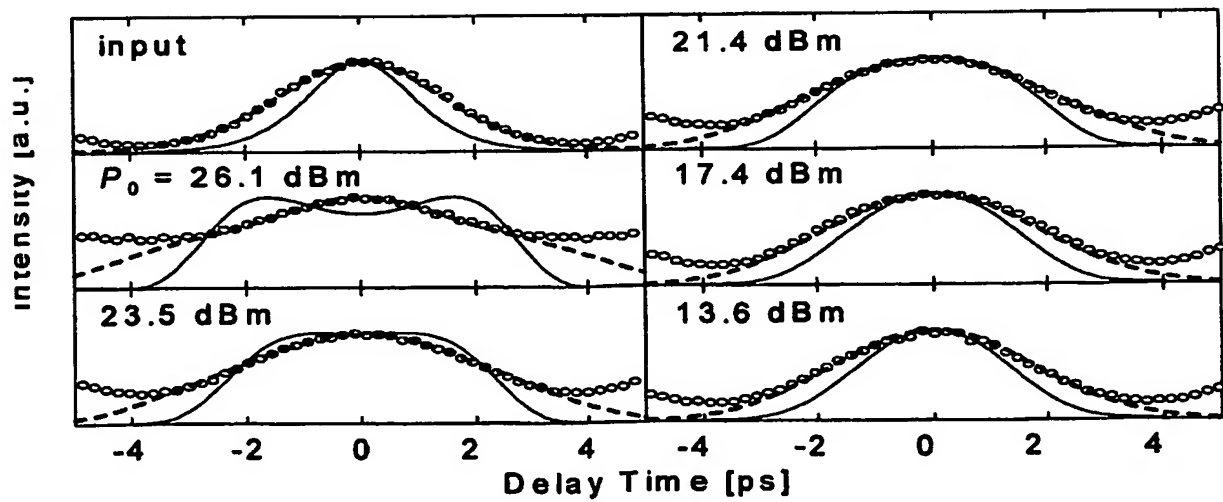


図31



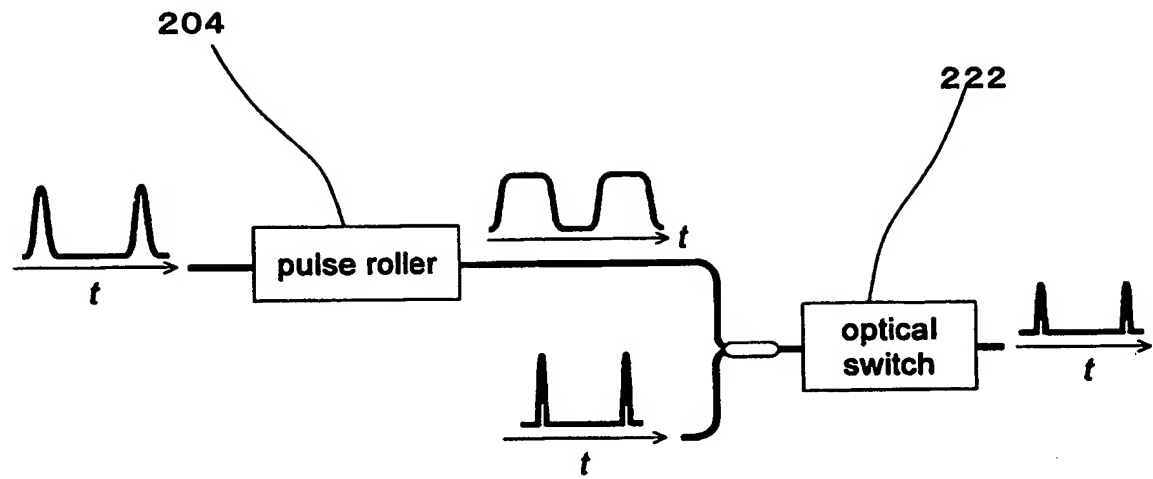


图32

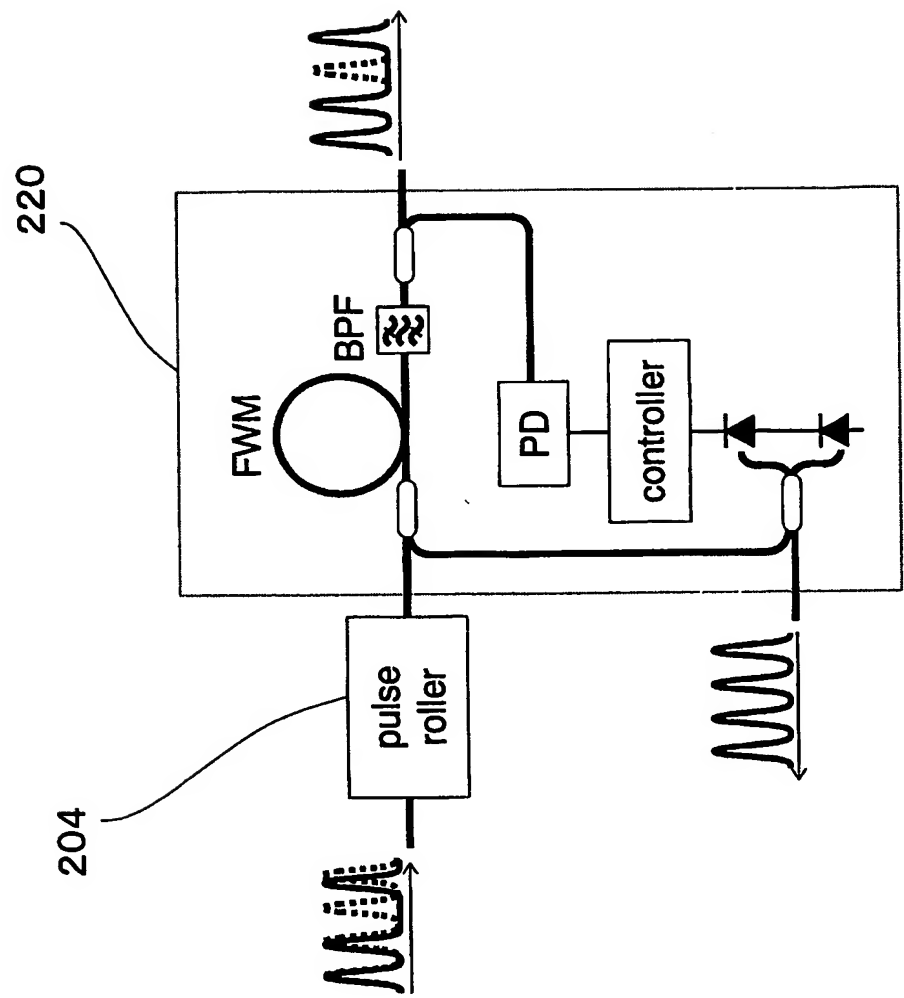


図33

図34A

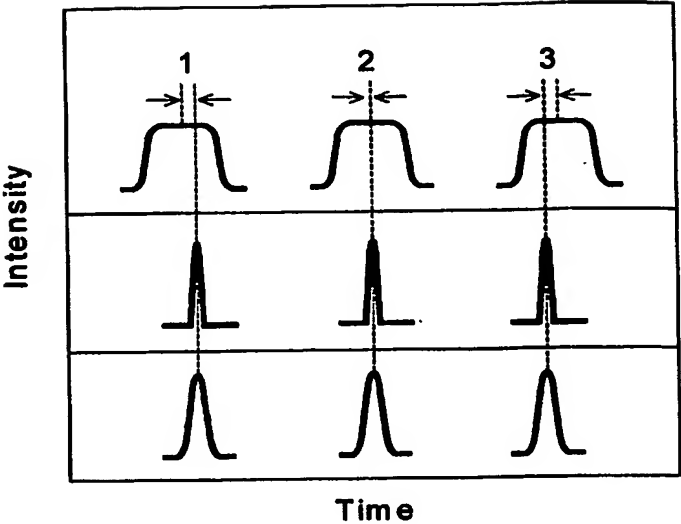


図34B

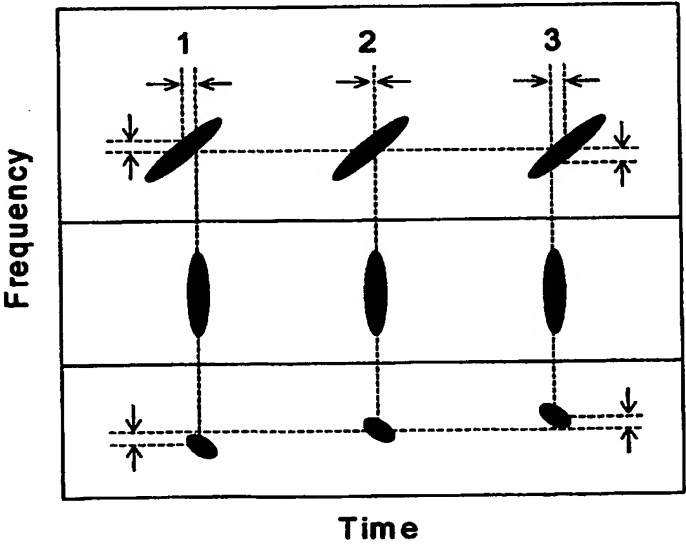


図35A

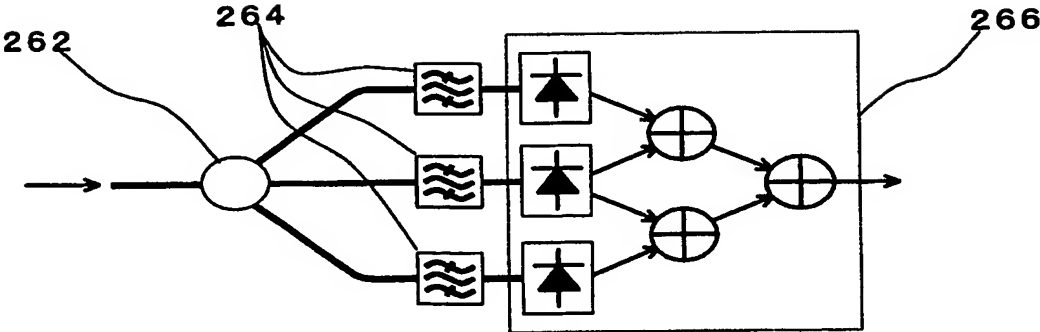


図35B

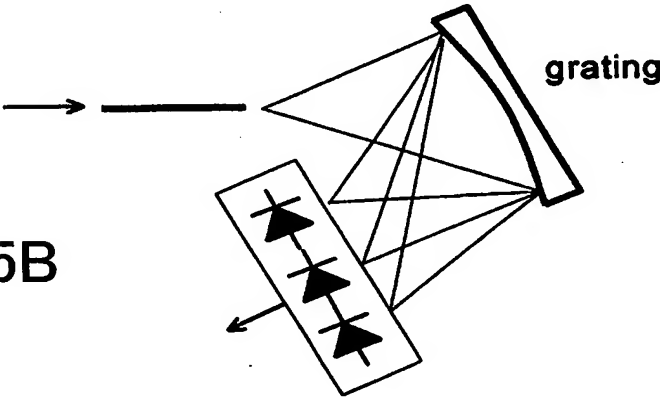


図36A

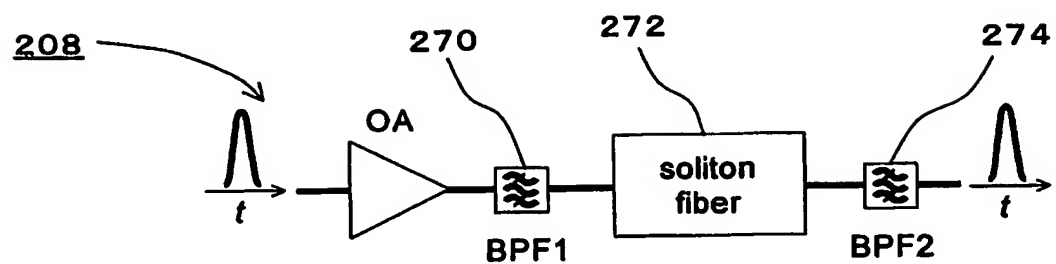


図36B

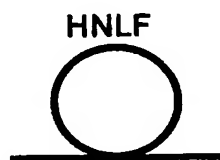


図36C

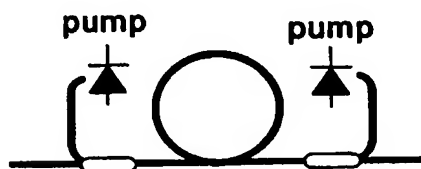


図37A

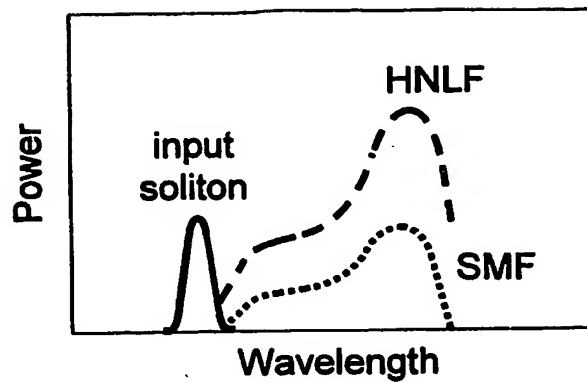


図37B

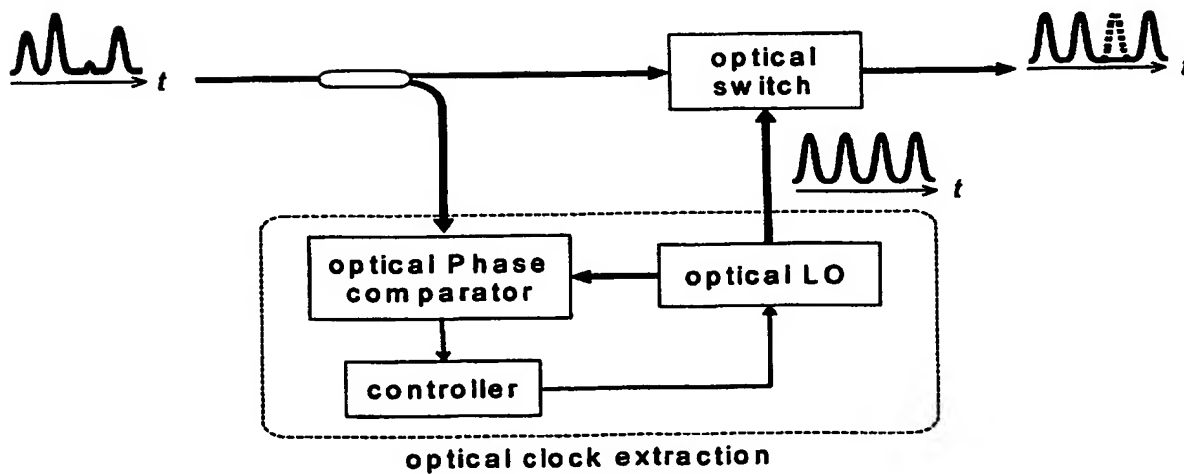
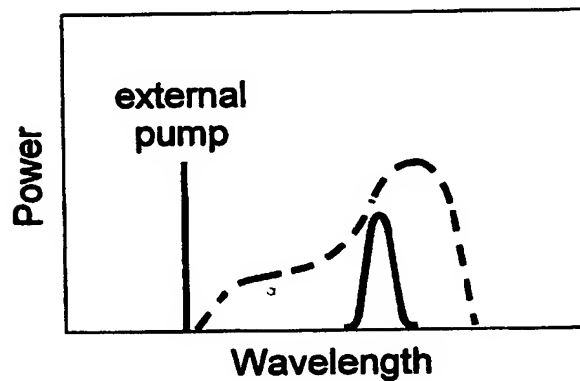


図38

図39A

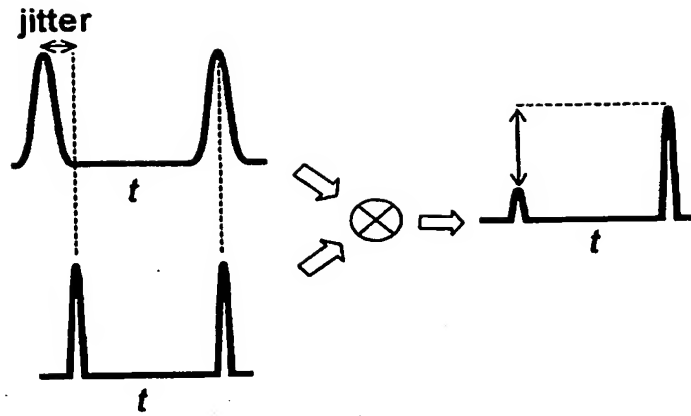


図39B

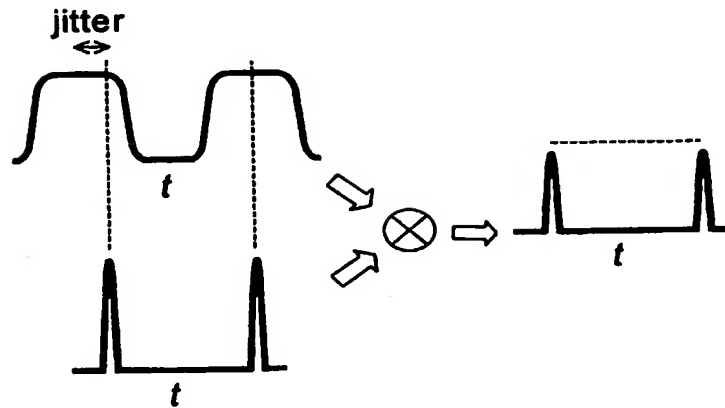


図40A

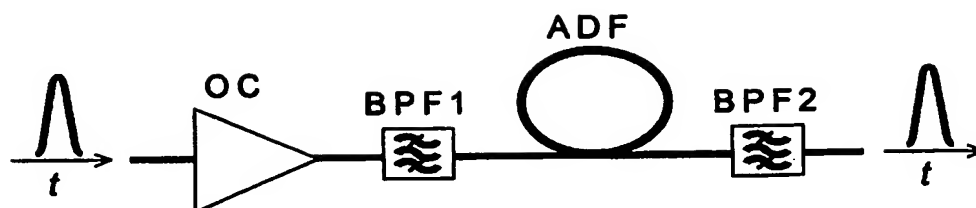


図40B

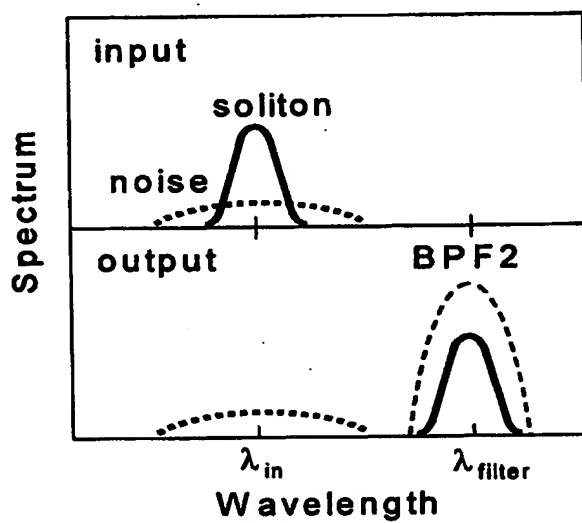


図41A



図41B

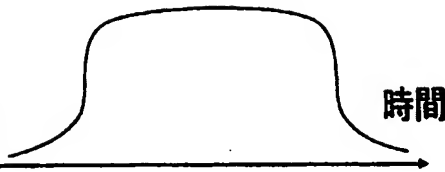


図41C

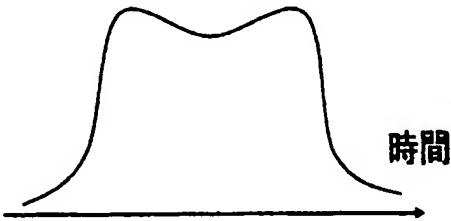


図41D

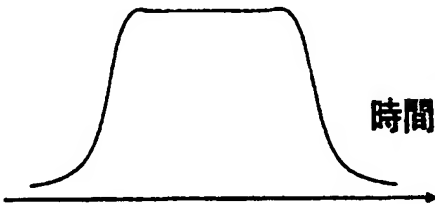
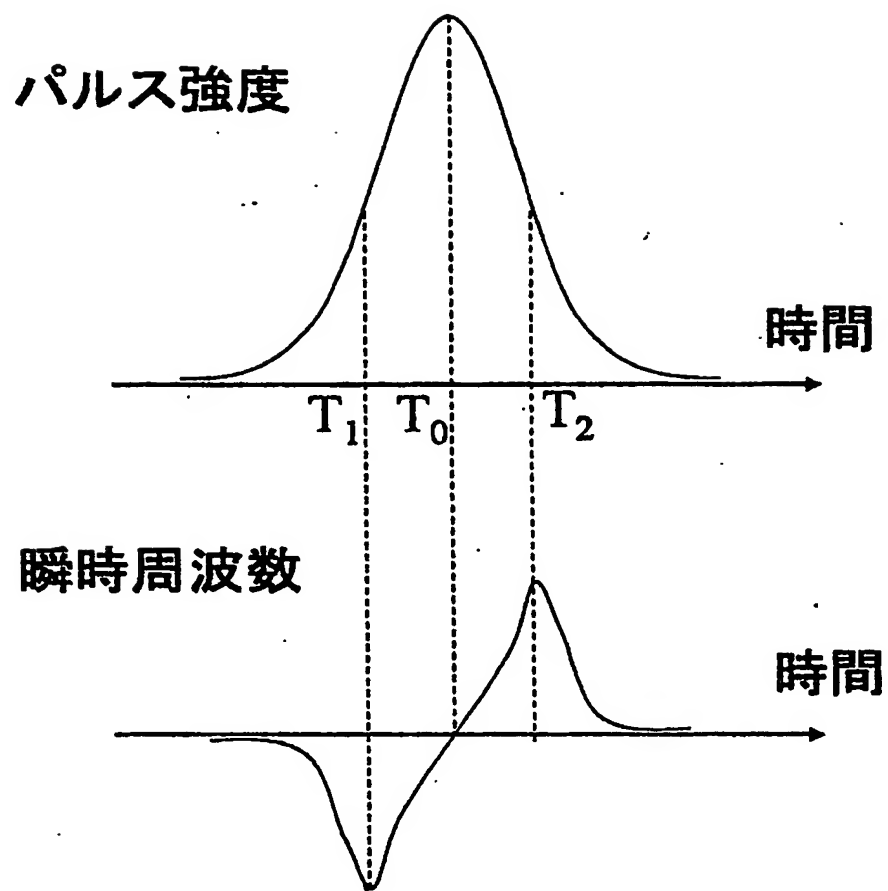


図42



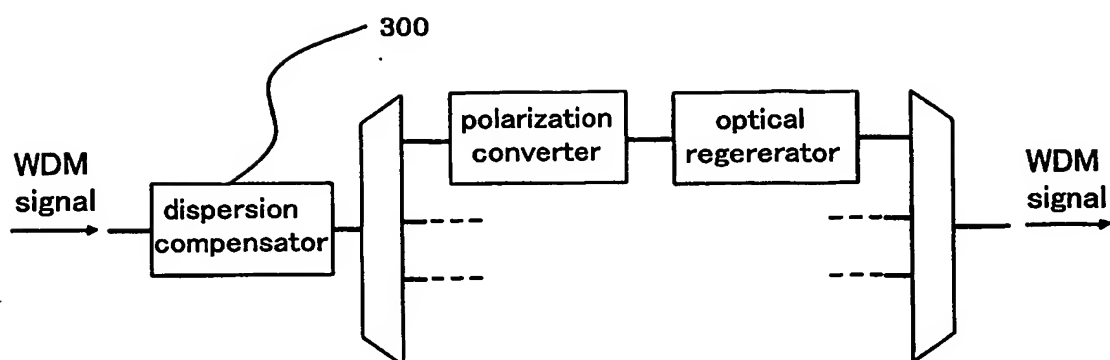


図43

図44

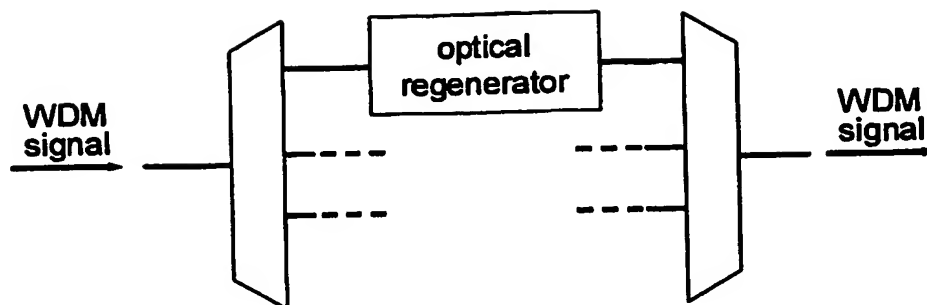


図45

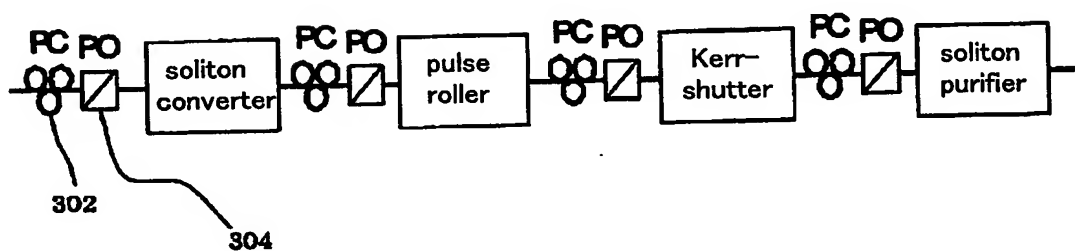


図46

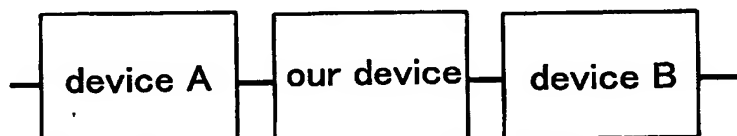


図47

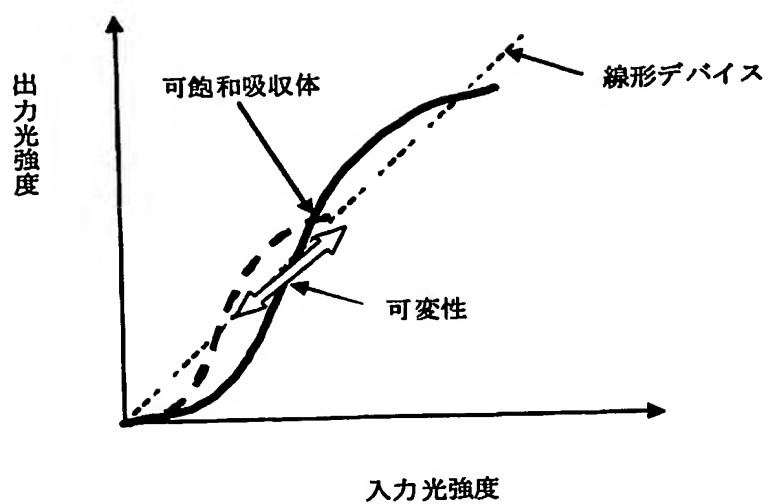


図48

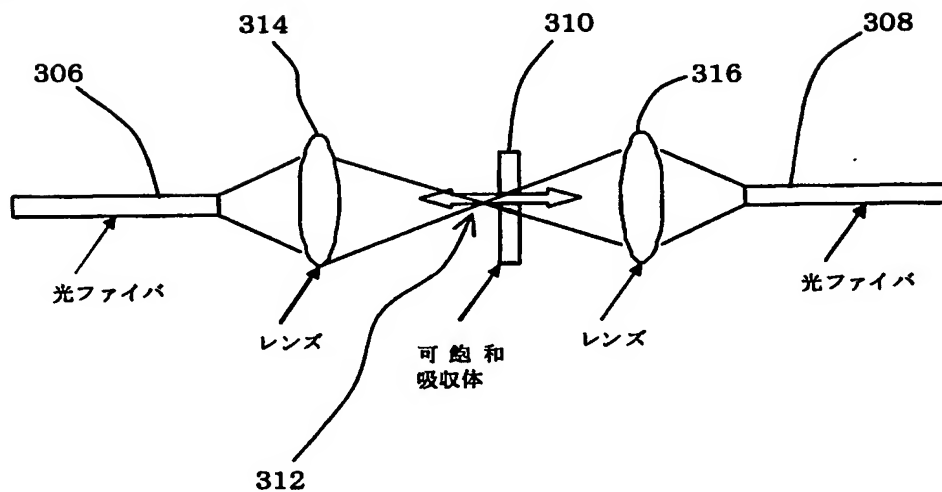


図49

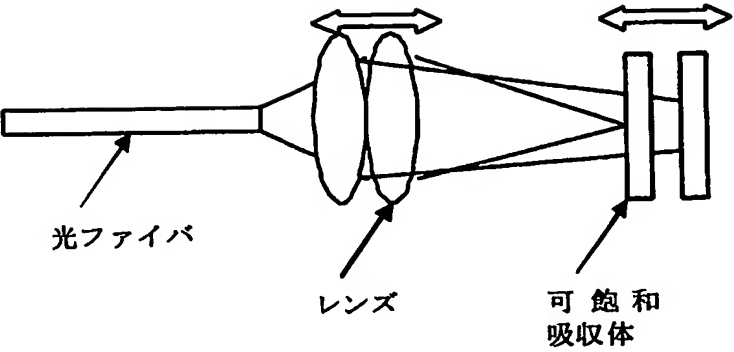


図50

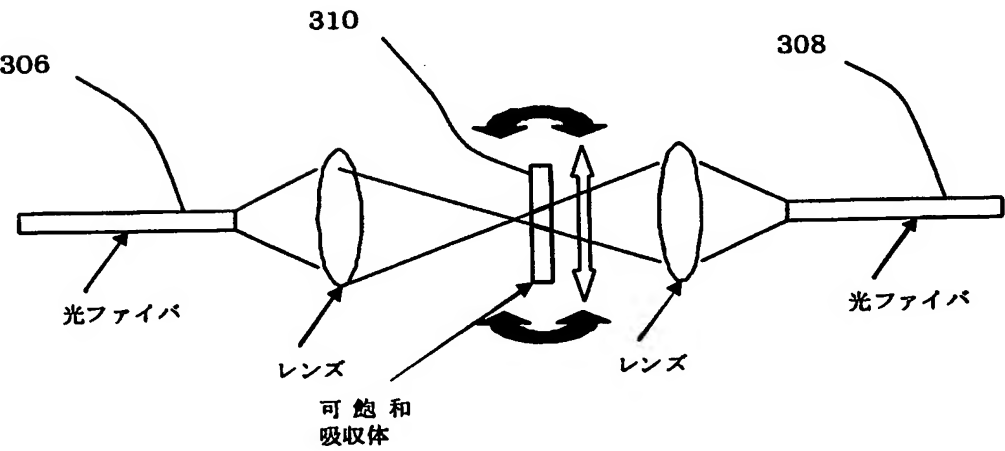


図51A

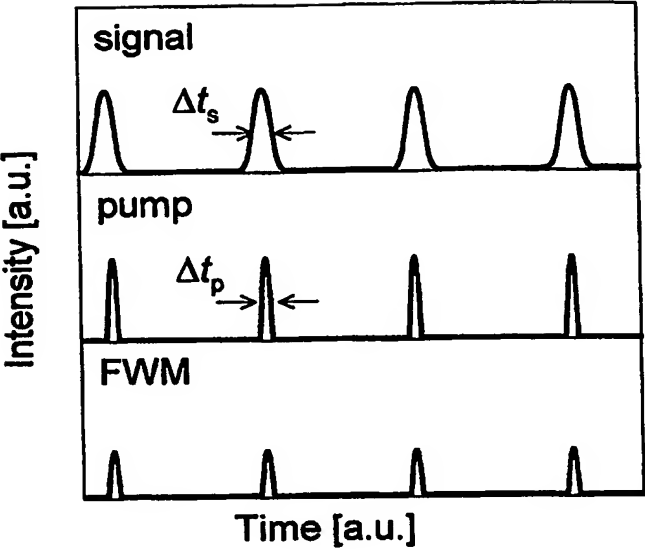
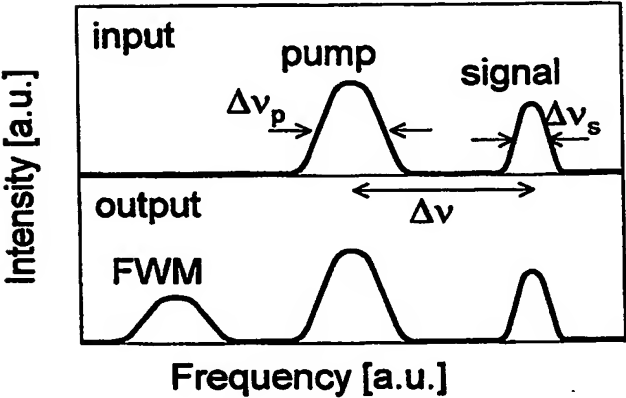


図51B



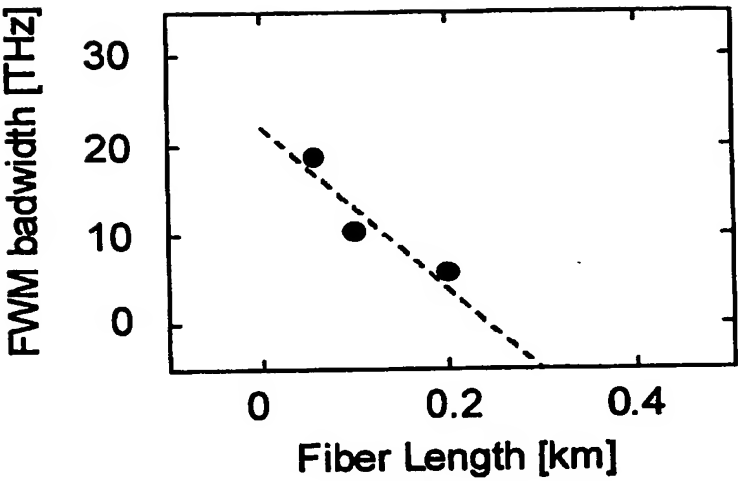


図52

図53

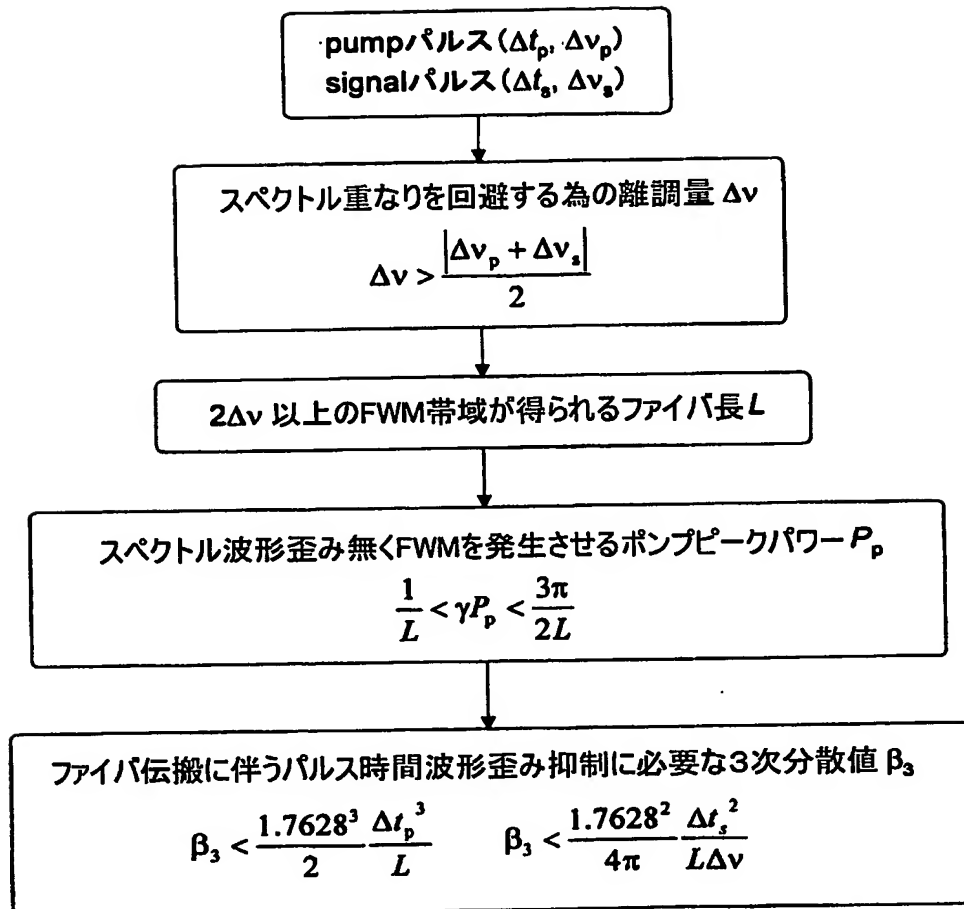


図54

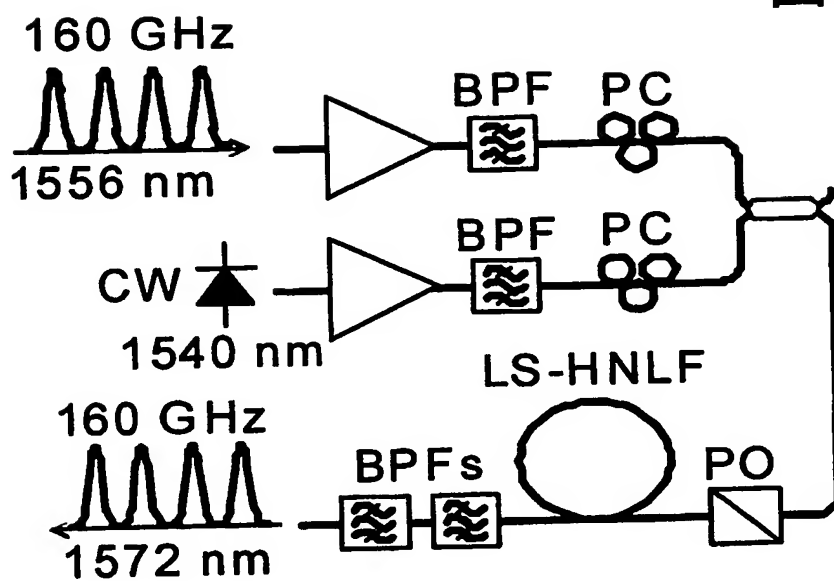


図55

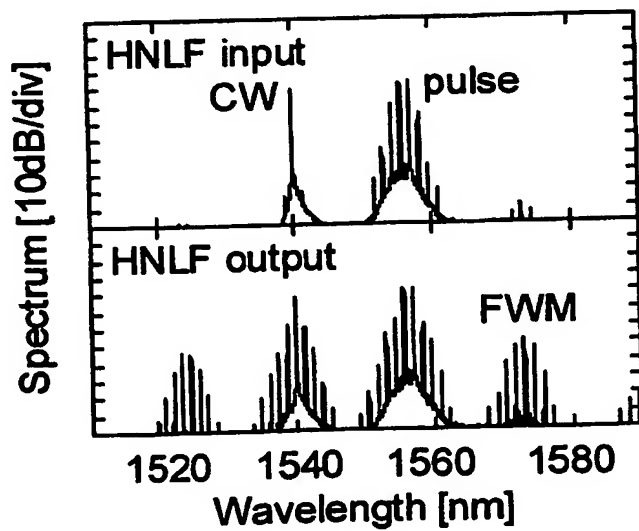


図56

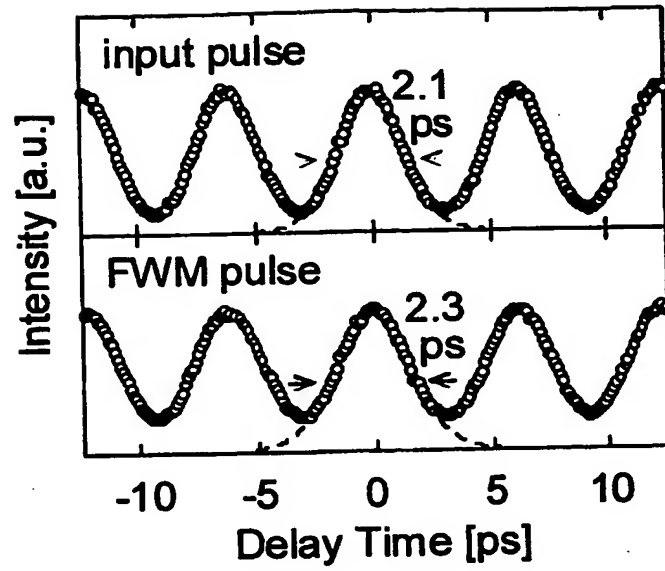


図57

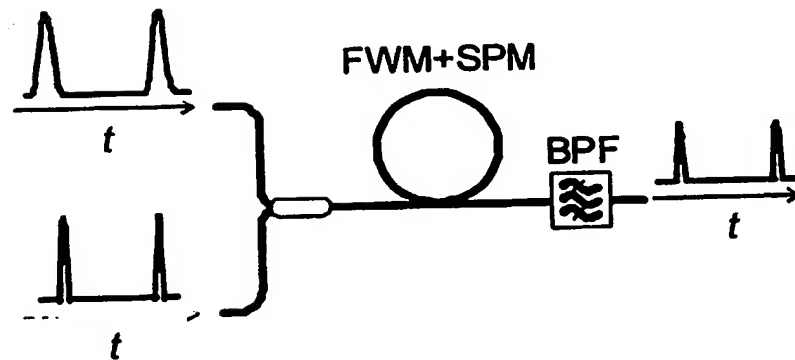


図58

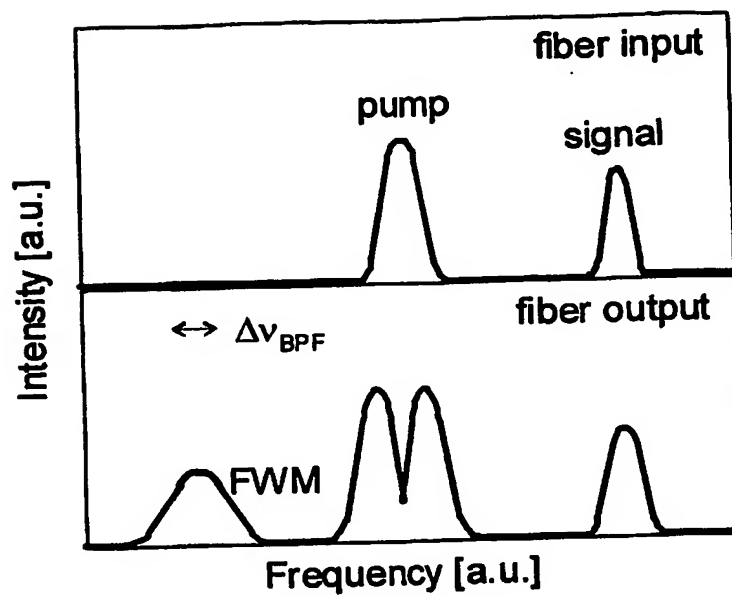


図59

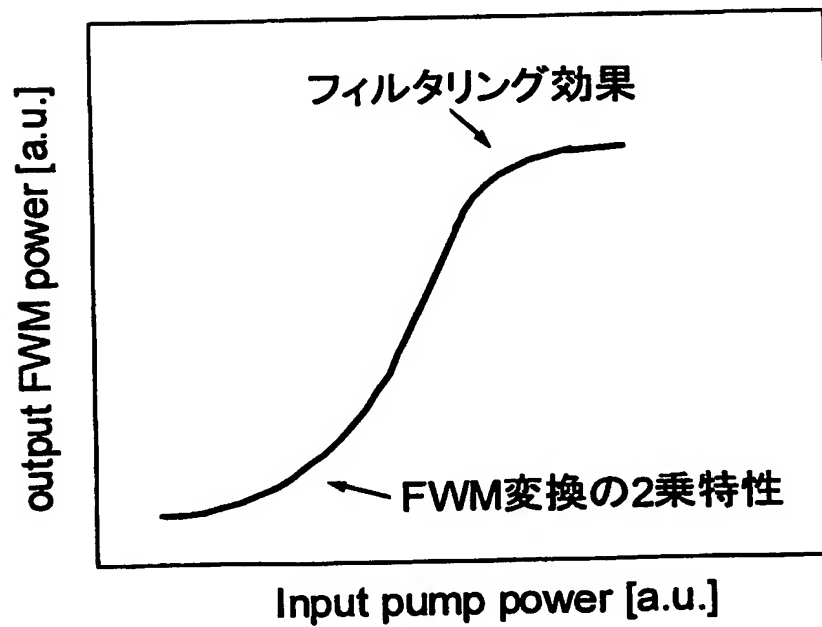


図60A

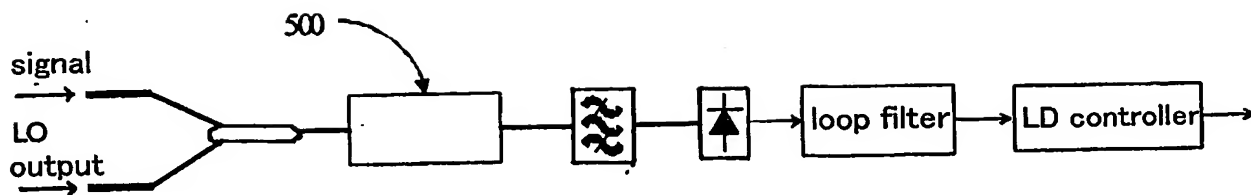


図60B

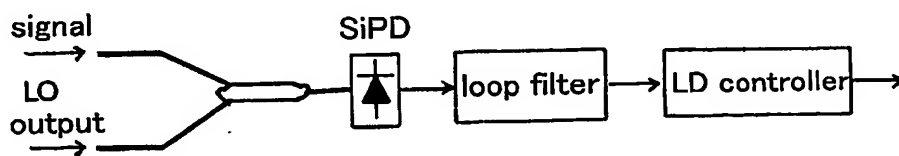


図61

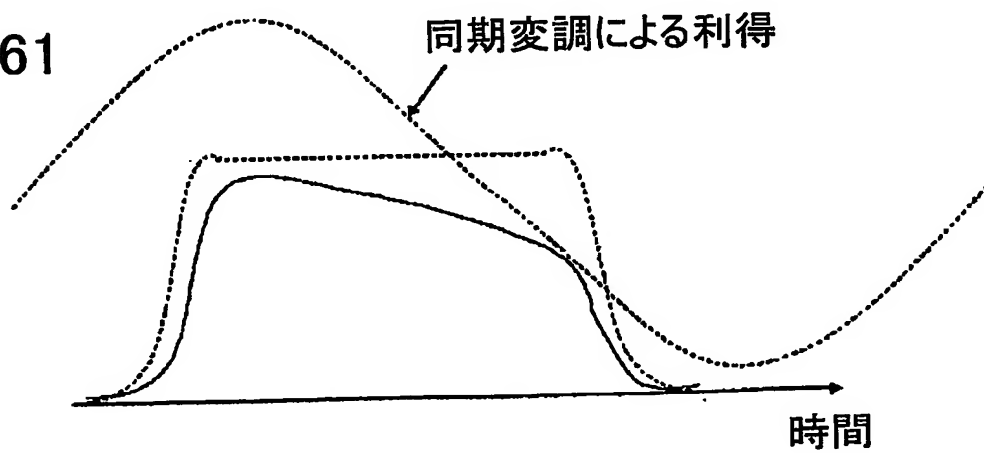


図62

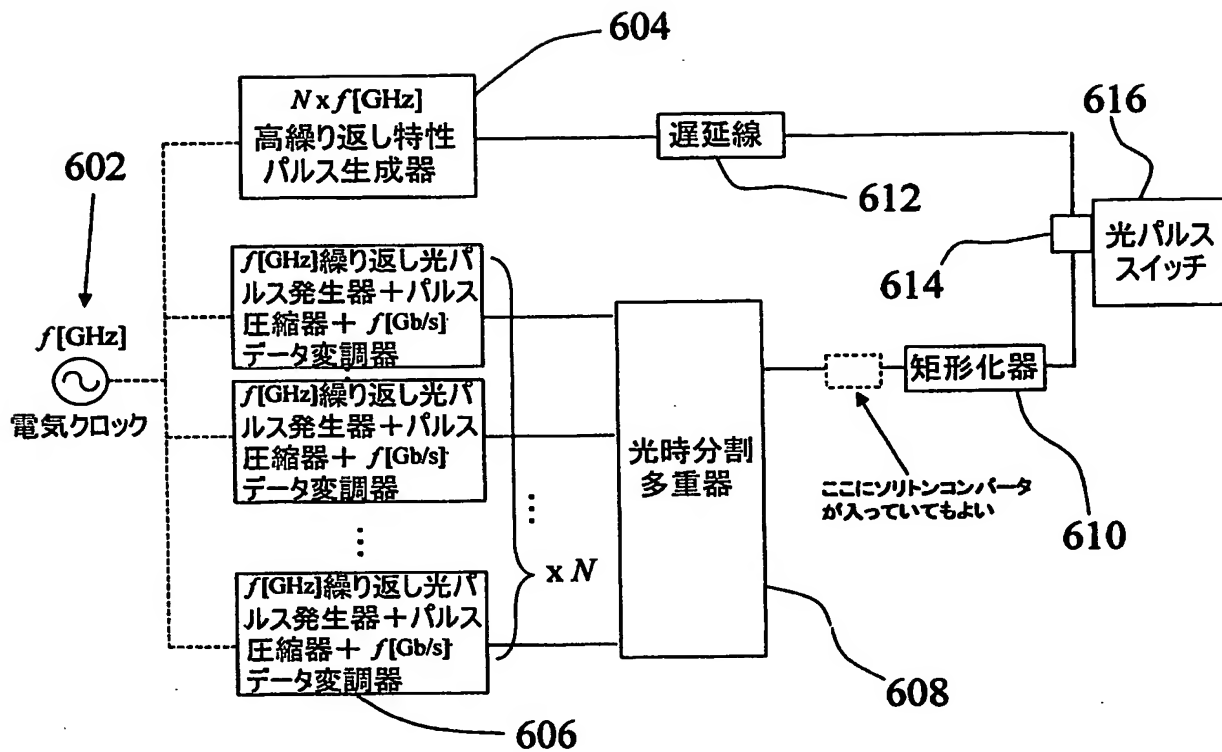


図64

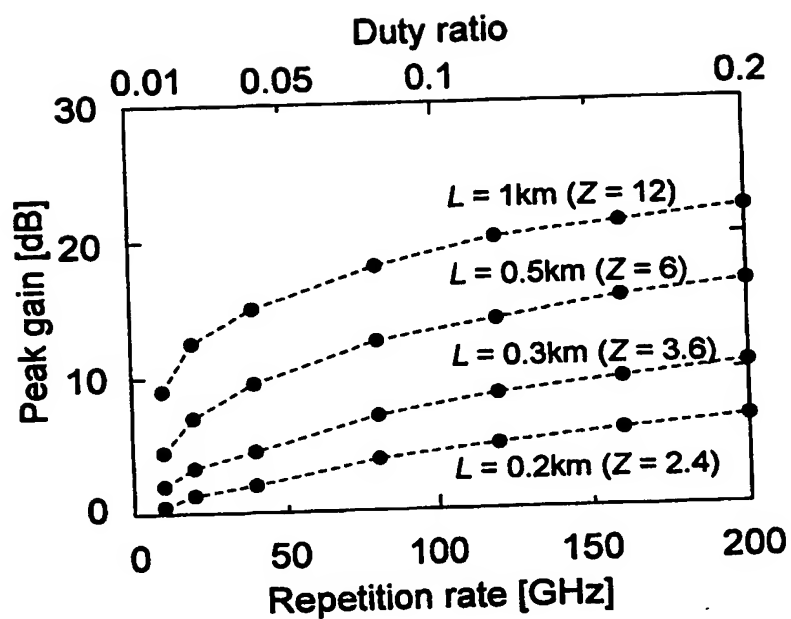
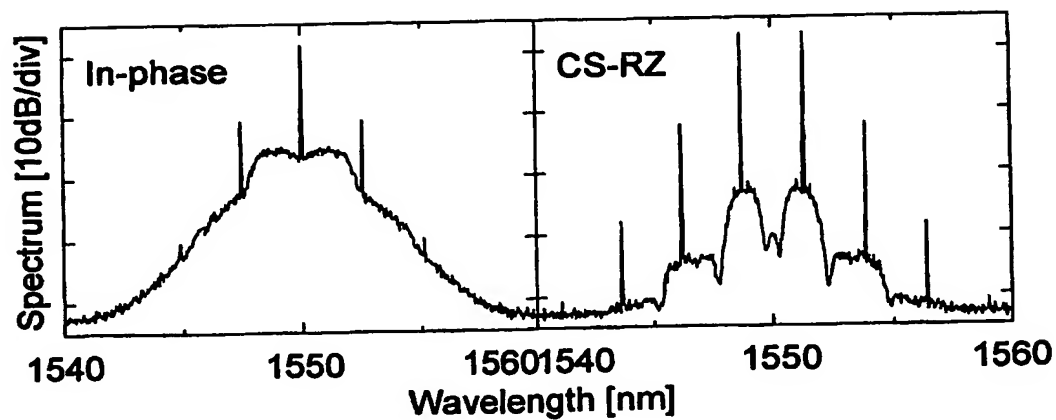


図65



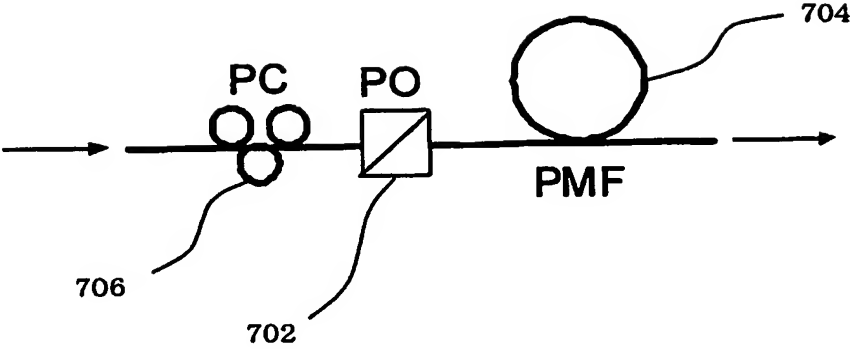


図 66

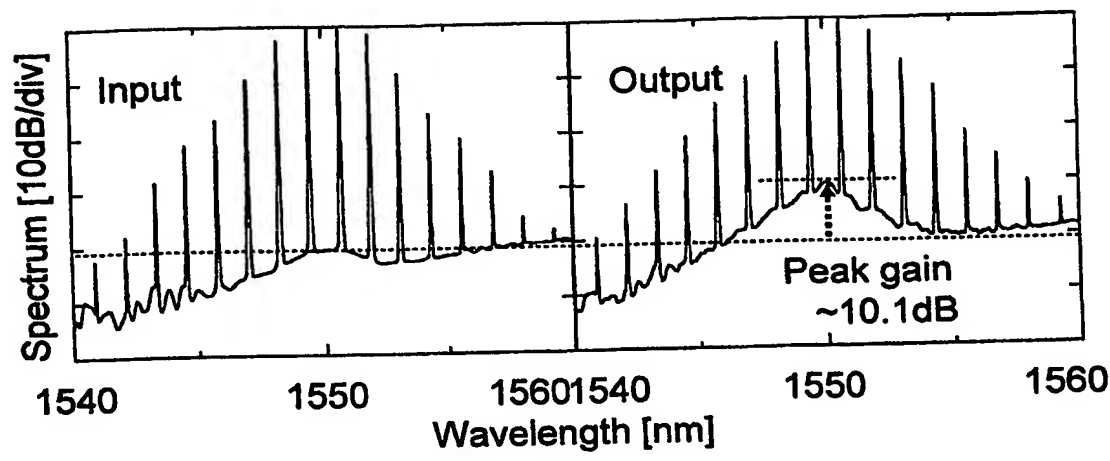
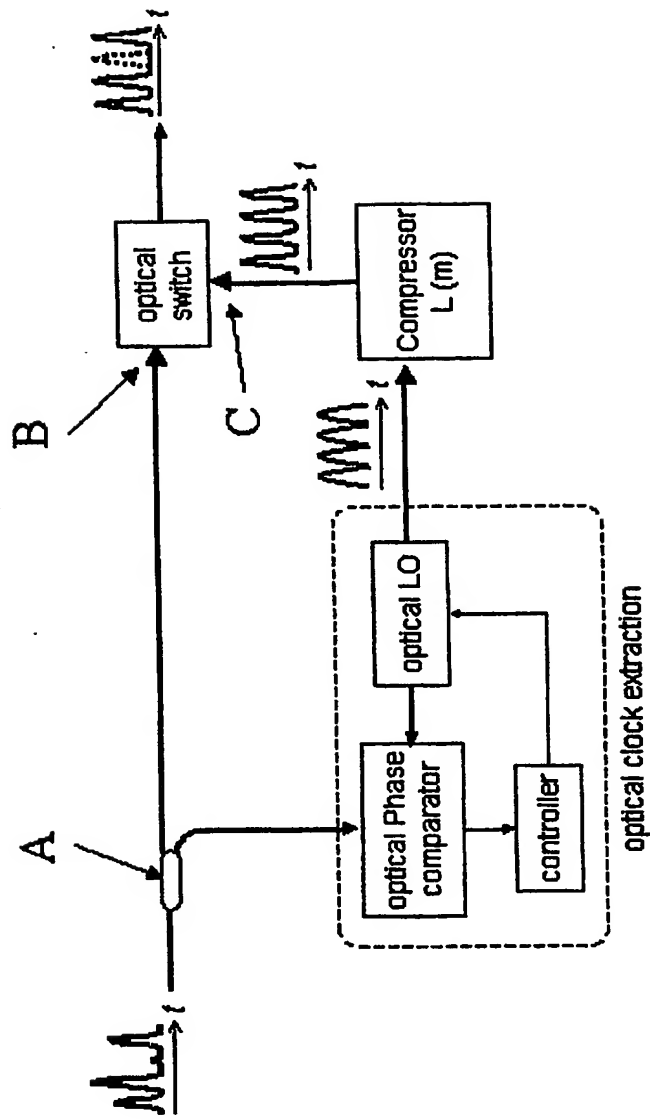


図67

図68



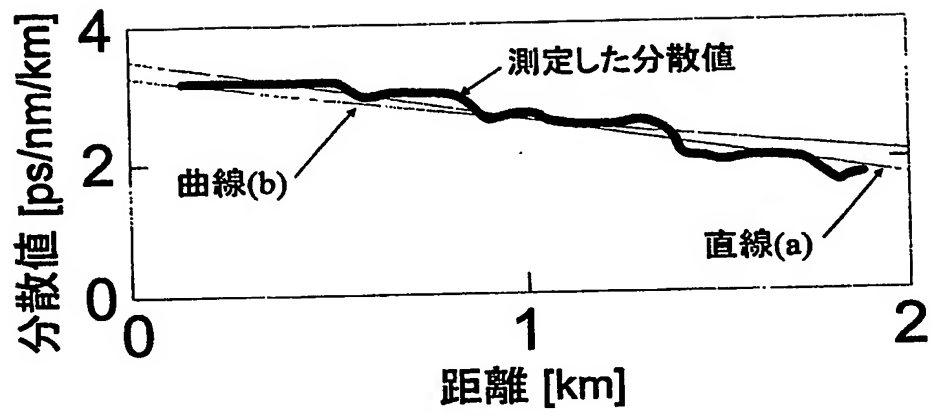
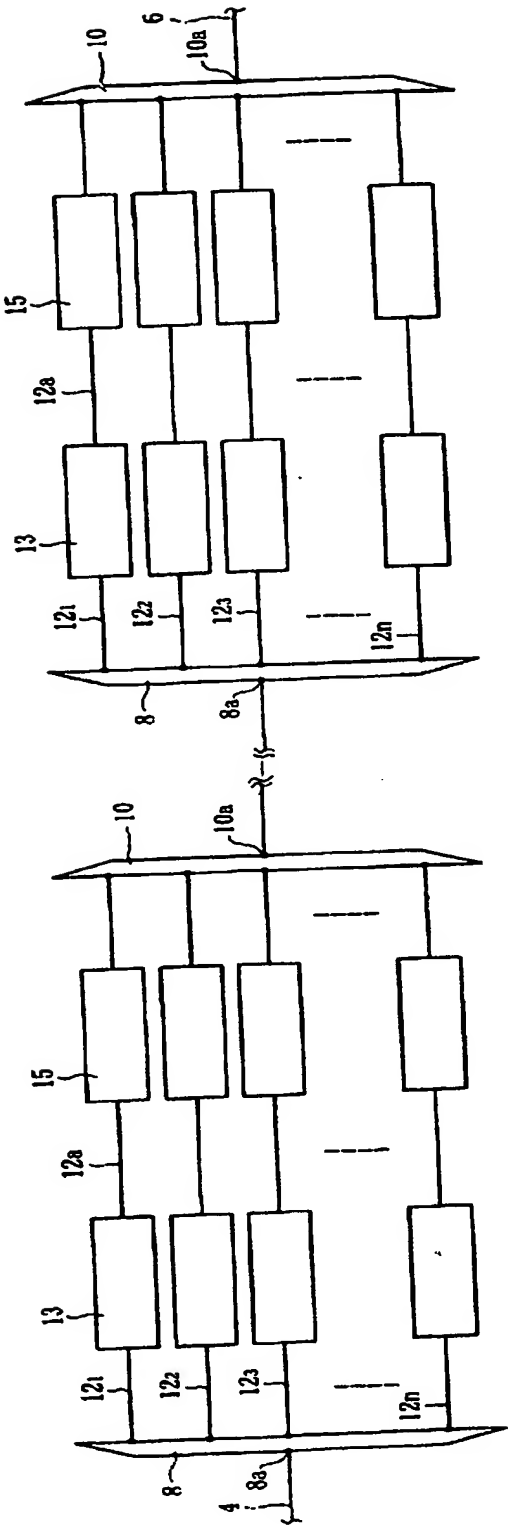


図69

图70



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.